



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA GEOLÓGICA

Curso 2022-2023

**Efecto de la agresividad medioambiental en la
durabilidad de tres de morteros hidráulicos de
construcción**

*Effect of environmental aggressiveness on the durability
of three types of hydraulic construction mortars*

ÁLVARO LOYOLA BEJERANO

TUTOR/ES: MARÍA JOSEFA VARAS MURIEL



**Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA
Curso 2022-2023**

**Efecto de la agresividad medioambiental en la
durabilidad de tres morteros hidráulicos de
construcción**

*Effect of environmental aggressiveness on the durability
of three types of hydraulic construction mortars*

ÁLVARO LOYOLA BEJERANO

TUTOR/ES: MARÍA JOSEFA VARAS MURIEL

Fdo: María José Varas Muriel

Fdo: Álvaro Loyola Bejerano

Firmado por VARAS MURIEL MARIA JOSEFA - DNI
12328975D el día 25/07/2023 con un certificado
emitido por AC Sector Público



ANEXO I: DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D./Dña. ÁLVARO LOYOLA BEJERANO
con NIF 03942934-K, estudiante de Máster en la Facultad de
CIENCIAS GEOLOÓGICAS de la Universidad Complutense de Madrid
en el curso 2022-2023, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado
"Efecto de la agresividad medioambiental en la durabilidad
de tres morteros hidráulicos de construcción".

y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/ es/son:

MARÍA JOSEFA VARAS NURIEL

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente.

De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 7 de JULIO de 20 23

Fdo.: Álvaro Loyola Bejerano

Esta DECLARACIÓN debe ser insertada en primera página de todos los trabajos fin de máster conducentes a la obtención del Título.

*La satisfacción radica en el esfuerzo, no en el logro.
El esfuerzo total es la victoria total.*

-Gandhi-

Agradecimientos

En primer lugar y una vez llegado a este punto en mi vida académica, me gustaría agradecer enormemente a María José Varas, por ayudarme, tutorizarme y guiarme en la elaboración de este trabajo durante todos estos meses. También agradecer sin duda, la ayuda brindada por parte de Amanda Gómez Marfil, antigua compañera mía del grado en Geología, y que siempre ha estado dispuesta a ayudarme con lo que necesitare y a echarme una mano en todo el proceso, sin duda una gran compañera.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a Marián Barajas y Carmen Valdehita, del Laboratorio de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), por su gran amabilidad y por su ayuda en la elaboración de las láminas delgadas y moliendas, imprescindibles para llevar a cabo el desarrollo de gran parte de este estudio. Gracias también a parte del equipo del CAI (Centro de Asistencia a la Investigación) de Geológicas, por el análisis químico de las muestras.

También me gustaría dar las gracias al equipo del laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias (UCM-CSIC), especialmente a Silvia y a Christian, por ayudarme con algunos de los equipos y ensayos, mostrarme el funcionamiento y el trabajo del laboratorio y dedicarme tiempo para obtener buenos resultados.

Por último, quiero agradecer a mis padres y hermanos, a mi pareja y a mis amigos el apoyo brindado, quienes han estado ahí siempre que lo he necesitado. Gracias por vuestra inmensa paciencia.

Sin todos vosotros, este trabajo no hubiese sido posible, gracias.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. ANTECEDENTES	3
3.1 Marco industrial.....	3
3.1 Marco histórico-constructivo.....	6
4 METODOLOGÍA	10
4.1 Materiales	10
4.2 Técnicas y ensayos.....	11
4.2.1 Caracterización petrográfica.....	11
4.2.2 Caracterización petrofísica.....	12
4.2.3 Caracterización mecánica	15
4.3 Ensayos de durabilidad	17
4.3.1 Resistencia a la cristalización de sales	17
4.3.2 Resistencia a la heladicidad con sales	17
5 RESULTADOS	19
5.1 Caracterización petrográfica.....	19
5.1.1 Descripción macroscópica	19
5.1.2 Descripción microscópica.....	21
5.1.2.1 Microscopía óptica de luz polarizada (MOP) y de fluorescencia (FL).....	21
5.1.3 Análisis mineralógicos y químicos	24
5.1.3.1 Difractometría de rayos X (DRX)	24
5.1.3.2 Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (TD-TG)	27
5.2 Caracterización petrofísica antes y después del deterioro inducido.....	28
5.2.1 Propiedades superficiales	28
5.2.1.1 Espectrofotometría	28
5.2.2 Propiedades dinámicas	30
5.2.2.1 Propagación Ultrasónica (Vp) y Anisotropías (dM y dm).....	30
5.2.3 Propiedades estructurales.....	32
5.2.3.1 Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM).....	32
5.2.3.2 Ensayo hídrico de saturación (SAT)	34
5.3 Caracterización mecánica	35
5.3.1 Resistencia al rebote. Dureza superficial de Schmidt (R)	35
5.3.2 Resistencia al microrrebote. Microdureza superficial de Leeb (HLD).....	36
5.3.3 Resistencia a la compresión simple uniaxial indirecta (RCS)	37
5.3.4 Resistencia a la perforación (DRMS)	39
6 DISCUSIÓN	40
7 CONCLUSIONES	44
8 BIBLIOGRAFÍA	46

Resumen

Los morteros hidráulicos son materiales enormemente utilizados en ingeniería civil, edificación y rehabilitación, por lo que conocer sus características es de gran importancia. Es imprescindible determinar su calidad y durabilidad en el tiempo, ya que el agua o las sales son los agentes de deterioro más importantes e incontrolables en construcciones, tanto históricas como modernas, y así evitar sobrecostos por reparaciones tras un deterioro temprano.

Los tres morteros hidráulicos estudiados son dos cales (una natural; NHL5., y otra aditivada; HL5), y un cemento artificial Portland (AC). Éstos se sometieron a dos ensayos de deterioro inducido, recreando ciertas condiciones ambientales, como es el ataque de los sulfuros y los efectos del hielo-deshielo junto a cloruros. Con la finalidad de establecer una comparativa, se realizó una caracterización empleando una serie de técnicas normalizadas desde un punto de vista petrográfico, petrofísico y mecánico, antes y después de los ensayos

De este modo, se ha comprobado que según las características físico-mecánicas del mortero de cemento artificial Portland (AC), éste presenta mejor calidad para ser usado en una obra, ya que destaca por su dureza y resistencia. Sin embargo, al considerar el efecto de la agresividad medioambiental, el mortero de cal hidráulica natural (NHL5) ha dado mejores resultados, al contrario que el mortero de cemento artificial (AC) o de cal aditivada (HL5).

Abstract

Hydraulic mortars are widely used materials in civil engineering, building and rehabilitation, so knowing their characteristics is of vital importance. It is essential to determine its quality and durability over time, because water or salts are the most important and uncontrollable agents of deterioration in both historical and modern constructions, and thus additional costs for repairs will be avoided after an early deterioration.

The three types of hydraulic mortars studied are two limes (one natural; NHL5., and another with additives; HL5), and one artificial Portland cement (AC). These were subjected to two induced deterioration tests, recreating certain environmental conditions, such as the attack of sulphides and the effects of frost-thaw together with chlorides. In order to establish a comparison, a characterization was carried out using a series of standardized techniques from a petrographic, petrophysical and mechanical point of view, before and after the tests.

In this way, it has been verified that according to the physical-mechanical characteristics of the Portland artificial cement mortar (AC), it presents better quality to be used in a construction, because it stands out for its hardness and resistance. However, when considering the effect of environmental aggressiveness, natural hydraulic lime mortar (NHL5) has given better results, contrary to artificial cement (AC) or additivated lime mortar (HL5).

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los morteros hidráulicos son los materiales de construcción más usados en el mundo para obras de ingeniería civil, edificación y rehabilitación de patrimonio. Por definición, los conglomerantes o ligantes, junto al árido y el agua añadidos, constituyen los morteros (Martínez *et al.*, 2012). Los morteros se consideran un tipo de piedra artificial, englobada dentro de los geomateriales o materiales de construcción. A su vez, los geomateriales son materiales de origen geológico que, tras un proceso de mayor o menor elaboración, son empleados en diversos sectores constructivos o industriales (R. Fort, 2011).

Estudiar la calidad de estos geomateriales destinados a la construcción, comienza con la caracterización petrográfica, petrofísica y mecánica de los mismos, lo cual depende de sus características intrínsecas (Gómez-Márfil y Varas-Muriel, 2023; UNE-EN 17187, 2020 y Benavente *et al.* 2004). Estudiar las características intrínsecas de un material consiste en identificar su mineralogía, textura y estructura internas (López-Arce *et al.*, 2011).

Hay que destacar que, en multitud de construcciones antiguas, los morteros conforman una parte importante de dichas estructuras y contribuyen significativamente a su estabilidad estructural (Giavarini *et al.*, 2006; Adams *et al.*, 1993), por lo que el uso de morteros de alta calidad ha permitido su durabilidad en el tiempo y en el espacio, después de la acción agresiva del ambiente circundante. Se consideran duraderos en sentido químico o fisicoquímico aquellos morteros que una vez colocados en las condiciones reales de trabajo y servicio, no verán mermadas sus propiedades ni su resistencia (Calleja, 1963).

Los conglomerantes estudiados son de tipo hidráulicos, los cuales fraguan tanto en medio seco (aéreo) como en medio húmedo (sumergido) y en distintos rangos de temperaturas. En el proceso de fraguado, se dan una serie de reacciones químicas exotérmicas, de hidratación y carbonatación, que dan lugar a las paragénesis minerales responsables de las propiedades mecánicas y/o resistentes de estos materiales (Calleja, 1963).

Estos materiales, a lo largo de su vida útil y al estar expuestos a factores ambientales, sufrirán procesos de deterioro que generan cambios en sus propiedades físico-mecánicas, químicas y estéticas. La buena calidad de un material va a garantizar el buen comportamiento de éste frente a la agresión de agentes externos, como la temperatura, el agua, las sales, esfuerzos, la acción antrópica, etc., por lo que su durabilidad en el tiempo no solo depende de las características petrográficas y petrofísicas del mortero en sí, sino también de diferentes factores externos (ambientales, geológicos, arquitectónicos, socio-culturales, etc).

De esta manera, los morteros antes de emplearse han de pasar una serie de rigurosos controles de calidad normalizados, que pueden variar dependiendo del país y que se rigen según las normas UNE EN (España-UE), ISO (internacional), etc., y detallan el tipo de técnicas, ensayos, y procedimiento a seguir en la elaboración, y según el uso que se les vaya a dar (Fort y Pérez, 2011)

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es estudiar cómo afecta la acción de los agentes ambientales más agresivos (agua, temperaturas y sales) en la durabilidad de los morteros de construcción elaborados con los principales conglomerantes hidráulicos, que existen actualmente en el mercado mundial (cales hidráulicas, naturales y aditivadas, y cemento artificial Portland).

Se analizará detalladamente la calidad inicial de tres tipos de morteros hidráulicos empleados en construcción y rehabilitación, y se evaluará el comportamiento que muestran frente a factores de degradación climática, como son las variaciones de temperaturas y la presencia de sales disueltas en el agua, lo cual constituye un problema a medio y largo plazo para la durabilidad de las estructuras ingenieriles.

Por un lado, se simularán condiciones de mantenimiento invernal, donde el uso de las salmueras salinas es muy frecuente para reducir el punto de congelación del agua y, por consiguiente, la presencia del hielo tanto en la superficie como en el interior de cualquier estructura y construcción. Por otro lado, se simularán procesos de ataque por parte de los sulfatos, que son las sales más frecuentes y agresivas para la estabilidad estructural de una obra de hormigón o mortero en contacto permanente con el agua, ya que pueden aumentar su volumen hasta en un 30%, siendo muy peligrosa su presencia en el interior de las estructuras.

3. ANTECEDENTES

3.1 Marco industrial

Actualmente, los principales conglomerantes hidráulicos que se comercializan son de dos tipos: cales hidráulicas y cementos artificiales (Fig. 1). Su fabricación implica el uso de las mismas materias primas, pero con distintas mezcla y técnicas de elaboración, aunque su finalidad es la misma, fraguar en ambientes húmedos o bajo el agua, y reaccionar con el CO₂ atmosférico para carbonatarse y endurecer.

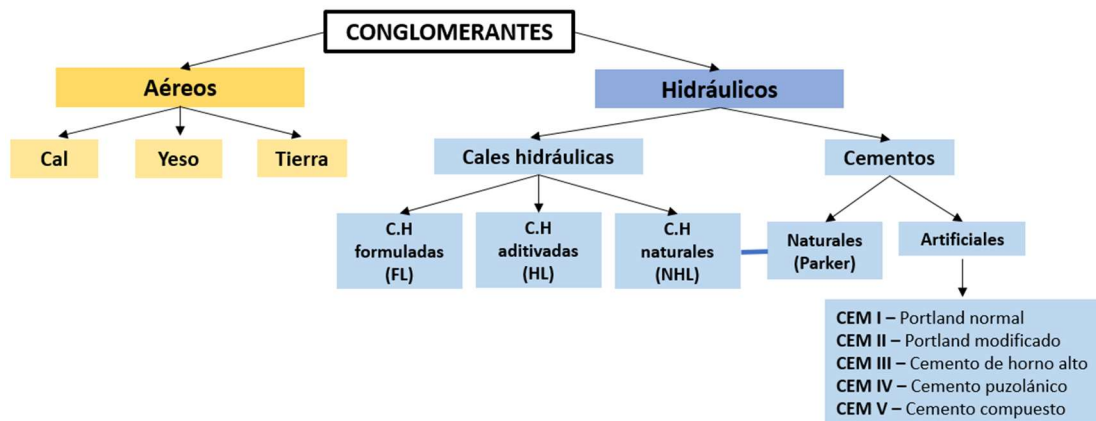


Figura 1. Esquema de los tipos de conglomerantes actuales.

3.1.1 Cales hidráulicas

Se fabrican conforme a la norma UNE-EN 459-1 (2016). Implica la calcinación de piedras calizas y arcillas o de calizas que contienen en su interior sílice y aluminio (calizas margosas), en una concentración del 5 al 20%. La cocción de sus materias primas (calizas + arcillas o calizas margosas) se realiza en hornos verticales continuos (vía seca), e implica temperaturas altas (1200°C), pero sin superar la temperatura de fusión o vitrificación (1450°C). Este ligante, a diferencia del cemento, fragua rápidamente, mejora su resistencia con el tiempo y ayuda a mejorar la durabilidad de otros materiales presentes en la estructura de los edificios. Hoy se está volviendo a descubrir este material para el uso en los revestimientos de paredes y suelos, debido a que es una garantía de durabilidad.

Existen tres grandes grupos de cales hidráulicas: naturales (NHL), aditivadas (HL) y formuladas (FL). Este último grupo no se vende en España por su elevado contenido en sulfatos

Las cales hidráulicas empleadas, son de la empresa francesa de Saint Astier (Chaux & Enduits de Saint-Astier, CESA). En cuanto al contexto geológico, Saint-Astier es una pequeña localidad en el centro-oeste de Francia, a 93 Km al este de Burdeos, que se encuentra ubicada en una cuenca sedimentaria marina, de edad mesozoica y dónde tuvo lugar una gran acumulación de depósitos marinos carbonatados. Estos depósitos constituyen una serie de estratos bastante regulares de carbonatos, que presentan un destacado color blanco, con una composición química y mineralógica constante (calcita), y de una calidad excepcional. Estas

características hacen que se trate de un depósito explotable para obtener cales tanto hidráulicas como aéreas (Fig. 2).



Figura 2. Instalaciones del centro de producción de cal de la empresa francesa de Chau & Enduits de Saint-Astier, CESA. Imagen tomada de <https://www.calhidraulica.es/la-cal-de-saint-astier-historia/>.

Las características más destacables de las dos cales hidráulicas que se van a utilizar en este trabajo, son:

- La cal hidráulica natural – NHL-5; caracterizada por presentar el grado más alto de hidraulicidad dentro de este grupo de las cales hidráulicas naturales, presenta una alta resistencia (~100 bars) y velocidad de fraguado, además de otorgar a sus morteros cualidades específicas de plasticidad, rendimiento, manejabilidad y respiración. Es un conglomerante de color gris claro ya que, su contenido inicial en componentes silíceos es del 13-16%. Las cales hidráulicas naturales no tienen incorporado ningún otro aditivo. Su campo de aplicación es amplio: muros de fábrica, mampostería (Fig.3), ladrillos, restauración y obra civil.



Figura 3. Muro de mampostería con mortero cal hidráulica natural NHL5. Imagen tomada de:

<https://www.cthnavarra.com/cth/web/cth/webcth.nsf/app/producto/Mortero-albanileria/Myrsac37X>

- Cal hidráulica aditivada - HL5; es un ligante técnico o artificial, al que se le han incorporado añadidos como: cemento, escoria de alto horno, cenizas volantes, *filler* calizo u otros materiales adecuados, con la finalidad de aportarle un carácter más hidráulico. El HL5 constituye una mezcla de cal hidráulica natural NHL-5 con hasta un 20% de cemento artificial Portland. Se usa en la elaboración de soleras que requieran resistencias elevadas, morteros de revestimiento (Fig.4), además de otros muchos usos en albañilería.



Figura 4. Mortero de revestimiento de cal aditivada HL5. Imagen tomada de: <https://testaverde.es/productos/gordillos-cal-de-moron/>

3.1.2. Cementos artificiales

El cemento artificial por excelencia es el cemento Portland, así llamado por la semejanza en su aspecto con las rocas de la isla de Portland, en el condado de Dorset (Inglaterra). El siglo XX, es el siglo del empleo del cemento en los morteros y hormigones de construcción de todo el mundo. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), el aumento de la población global, los procesos de urbanización crecientes y las necesidades de infraestructura para el desarrollo, hacen que la demanda de cemento esté en aumento a nivel mundial. Esto hace que el cemento Portland sea la sustancia manufacturada más consumida en el planeta y que el sector industrial de producción de cemento ocupe el tercer lugar en uso de energía y emisiones de CO₂ a la atmósfera.

En España, la elaboración, manipulación y tipología de cementos comercializados, está regulado por normas tales como la UNE-EN 197-1 (2011) o Reales Decretos (256/2016). Para su elaboración se emplean dos materias primas, calizas de alta pureza y arcillas, que deben de triturarse hasta tamaños de 0,5mm y mezclarse adecuadamente con una concentración del 20-25% en silicatos, antes de pasar a los hornos horizontales-rotatorios (vía húmeda) donde se cuecen por encima de los 1450°C, produciéndose la fusión de los componentes mezclados y la formación de gránulos de 1-3 cm conocidos como clínker. Este clínker se muele y se mezcla con el yeso para obtener el cemento Portland (Bustillo, 2008).

Se identifican cinco tipos de cementos (CEM):

- CEM I – Cementos Portland normal, donde el clínker se mezcla con yeso. Uso general. Fraguado lento.
- CEM II – Cementos Portland modificados. Se suele aditivar con otros compuestos para controlar alguna de sus funciones (resistencia, velocidad de fraguado, etc). Se utiliza para obras donde se utiliza gran cantidad de hormigón y/o están en contacto con el agua (p. ej; en presas). Ofrece resistencia al ataque de sulfatos o cloruros.
- CEM III – Cementos de horno alto. Se usa para construcciones de emergencia o elementos prefabricados. Alta velocidad de fraguado.
- CEM IV – Cementos puzolánicos, de uso frecuente en túneles y presas.
- CEM V – Cementos compuestos, que ofrecen alta resistencia a los ataques álcalis y sulfatos, por lo que es muy empleado en obras portuarias e hidráulicas (canalizaciones, puertos, tuberías, ...).

Las principales características del cemento clásico empleado en este estudio, son:

- El cemento clásico Portland - (CEM II/ B-L 32,5 N); es un conglomerante hidráulico artificial, de color gris verdoso oscuro. Su composición oscila entre un 65-79% de

clínker, 21-35% de caliza y un 0-5% de componentes minoritarios (por ejemplo, yeso que actúa como retardante del fraguado). Su resistencia a la compresión es de 16 MPa a los 7 días y de 32-52 MPa transcurridos 28 días. Tiene diversas aplicaciones como hormigones de limpieza y rellenos, hormigón en masa y armado, pavimentación, estabilización de suelos, capas de firmes en obras de carretera y otros trabajos de albañilería en general. El cemento clásico Portland empleado es de la empresa LafargeHolcim España, S.A.U. (Fig. 5).



Figura 5. Pavimentación mecanizada a base de mortero de cemento clásico Portland (AC). Imagen tomada de <http://www.imcyc.com/revistacyt/jul10/pavimentos.htm>

Hoy en día el mercado de la cal hidráulica vuelve a resurgir con fuerza, ya que se ha demostrado que el cemento artificial Portland no resulta del todo aconsejable para ciertos usos (Parra, 2020).

3.1 Marco histórico-constructivo

El primer conglomerante usado por la humanidad fue la cal, la cual fue extensamente empleada como material de construcción en las civilizaciones más importantes en torno al Mediterráneo Oriental y Europa, y fueron los griegos en torno al año 2000 a.C. los que comenzaron a usar el mortero de cal propiamente dicho (Malinowski, 1981). También los griegos fueron los primeros en crear los morteros de cemento natural (primer mortero hidráulico, Fig. 6) al mezclar la cal aérea con puzolanas naturales (cenizas y tobas volcánicas), o artificiales (cerámica y terracota trituradas o cenizas vegetales; Morgan, 1992, Válek et al., 2012). En este caso, es el árido puzolánico, rico en componentes silicio-alumínicos, los que reaccionaban con la cal aérea, proporcionando a la mezcla o argamasa sus características hidráulicas.

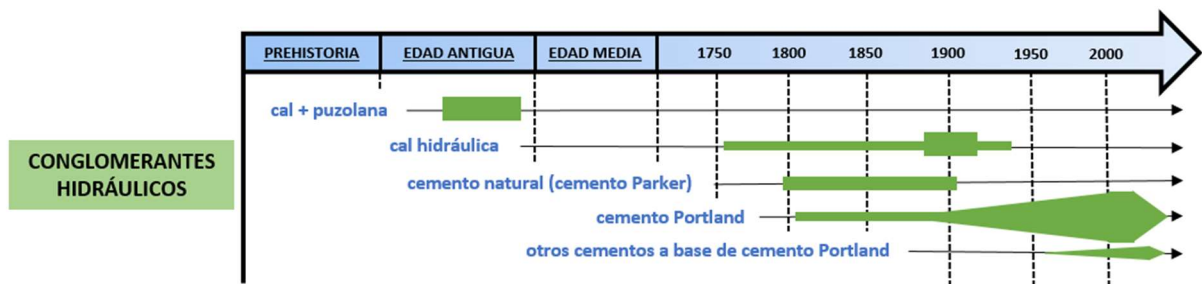


Figura 6. Evolución temporal de los conglomerantes hidráulicos en la historia. Modificado de Álvarez et al., 1995.

Posteriormente, estas técnicas fueron adquiridas por los romanos (200 a.C.), quienes fueron los primeros en asignar los términos mortero (*mortarius*) y hormigón (*opus caementicium*) y, además incorporaron mejoras en los procesos de fabricación de la cal aérea (*cal pura*) y en sus técnicas de aplicación, como fue la utilización de morteros multicapa que favorecían el endurecimiento y la impermeabilización (Ortega, 2001; Fort et al., 2023) y que están presentes en monumentos tan importantes y duraderos como el Panteón, el Coliseo (Fig.7) y otros muchos acueductos (Malinowski et al., 1991), que aún siguen estables más de 2000 años después de su construcción. Los romanos emplearon por todo el imperio, los morteros y hormigones a gran escala y, sobre todo, en obras hidráulicas (puertos, acueductos, canales, cisternas, etc).

Las principales características que hacen que el hormigón romano posea esa buena calidad era su minuciosa selección de materias primas, su homogeneidad, proporción adecuada y su elaborada fabricación, en la que la masa era comprimida expulsando las burbujas. Vitruvio y Plinio, dos eruditos romanos, describieron tales técnicas y procedimientos para conseguir los mejores resultados (Ortega, 2001). Esto podría explicar que, en algunas líneas de investigación (Malinowski, 1961, Malinowski, 1981, Furlan et al., 1975) en las que morteros romanos y actuales han sido sometidos a ciclos de degradación o envejecimiento acelerado, la resistencia y durabilidad de los morteros romanos siga destacando siglos después (Malinowski, 1979).



Figura 7. Coliseo o Anfiteatro Flavio construido en Roma (Italia) en el s. I a.C a base de morteros minuciosamente seleccionados. Imagen tomada de https://www.abc.es/ciencia/abci-secretos-argamasa-levantaron-imperio-202011220155_noticia.html.

Hasta la Revolución Industrial del siglo XVIII, no se volvieron a utilizar los morteros hidráulicos porque su técnica de elaboración se perdió. Durante este periodo, se volvieron a redescubrir los morteros hidráulicos, aunque en este caso eran diferentes a los morteros romanos. Fue en 1756, cuando el ingeniero inglés John Smeaton, con la intención de obtener una cal capaz de resistir la acción del agua salada del mar y poder colocarla en el Faro de Eddyston, observó que al calcinar calizas o margas impuras (con contenidos en arcilla 5-40%) obtenía un conglomerante con características altamente hidráulicas (Alvarez-Galindo et al., 1995; Varas et al., 2007; Arizzi and Cultrone, 2021). En este caso, la hidráulica estaba en el conglomerante por la presencia de componentes silicio-alumínicos en las materias primas originales.

Años más tarde, en 1796 y siguiendo la misma línea de investigación, James Parker fabricó lo que se conoce como el primer cemento natural rápido o cemento de Parker, el cual contaba con mayor hidráulica y velocidad de fraguado. Para ello, modificó las técnicas de elaboración, dosificando las mezclas de las materias primas y elevando la temperatura de cocción por encima de los 900°C (Varas et al., 2007).

En 1812, el químico francés Louis Vicat, demostró que las propiedades hidráulicas de los morteros dependían de los compuestos formados durante la cocción entre la caliza y los diferentes componentes de la arcilla (Alvarez-Galindo et al., 1995). Y así comenzó la investigación para unos nuevos conglomerantes, estableciéndose en 1814 las bases para la fabricación de los cementos artificiales (Varas et al., 2007). En 1824, Joseph Apsdin, patentó un cemento procedente de la molienda de la escoria (clínker) recogida del interior de los hornos y que se comercializó con el eslogan: *“tan duro como la piedra de Portland”* y cuya producción a escala industrial se inició en 1845 en hornos que alcanzaban temperaturas >1300°C (Varas et al., 2007). Este cemento Artificial Portland se empleó por primera vez en Londres, donde se construyó el túnel de la primera línea de metro de la ciudad, y todo su sistema de alcantarillado. En la Exposición Universal de París de 1889, se dio a conocer los beneficios de este nuevo producto de construcción, y a partir de ese momento su expansión fue ya imparable.

En España, el uso de los conglomerantes hidráulicos fue unos 50 años con retraso respecto al resto de Europa. Fue introducido en la Península durante las Guerras Carlistas a mediados del siglo XIX y se centró en la construcción de obras hidráulicas, como el Canal de Isabel II en Madrid o el puerto de San Sebastián (Varas et al., 2007). A partir de la segunda mitad del s.XIX, España empezó a producir y vender al exterior cales hidráulicas y cementos naturales de gran calidad. Los cementos artificiales comienzan su fabricación en España en torno a 1898-1900. La fabricación de cales hidráulicas y cementos naturales y artificiales, favorecieron la industrialización del norte de España (Asturias, País Vasco, Navarra y Cataluña). Sin

embargo, la Guerra Civil española, supuso el abandono de la producción de los conglomerantes hidráulicos naturales y el auge exclusivo de cemento artificial Portland, más eficaz en esos momentos para una rápida reconstrucción del país tras la guerra (Varas et al, 2007).

En la actualidad, el uso de la cal hidráulica vuelve a resurgir con fuerza, dado los múltiples problemas de deterioro y degradación que ha mostrado el cemento artificial Portland en el último siglo, planteándose recuperar el uso de los ligantes hidráulicos naturales, sobre todo en las áreas de restauración y reconstrucción ya que, a día de hoy, y tras 100-150 años, presentan una buena conservación, ya que muestran una buena resistencia a la agresión ambiental, como una adecuada compatibilidad con otros materiales con los que va asociado (Varas et al, 2007).

4 METODOLOGÍA

4.1 Materiales

Los materiales estudiados en el presente trabajo son tres tipos de morteros hidráulicos elaborados con dos cales hidráulicas del tipo NHL5 (natural) y HL5 (aditivada) de Saint Astier, y un cemento artificial Portland (AC) de Lafarge (Fig. 8). El árido empleado en las mezclas fue una arena silícea de cuarzo normalizada para el caso del NHL5, y de arena silícea con feldespatos para el caso del AC y del HL5.

Con estas mezclas se elaboraron 18 probetas prismáticas, 6 probetas por cada tipo de conglomerante. Estas probetas fueron debidamente nombradas y marcadas cada una de sus caras, con la finalidad de facilitar el dimensionamiento.

Las probetas fueron cortadas en el taller de la Facultad de Ciencias Geológicas con una sierra de disco de abrasión, con la intención de que todas ellas presenten unas dimensiones lo más similares posibles. Las probetas obtenidas presentan unas dimensiones medias de $45 \times 60 \times 100 \pm 9$ mm, pesos medios de 563 ± 55 g y volúmenes medios de 242 ± 14 cm³.

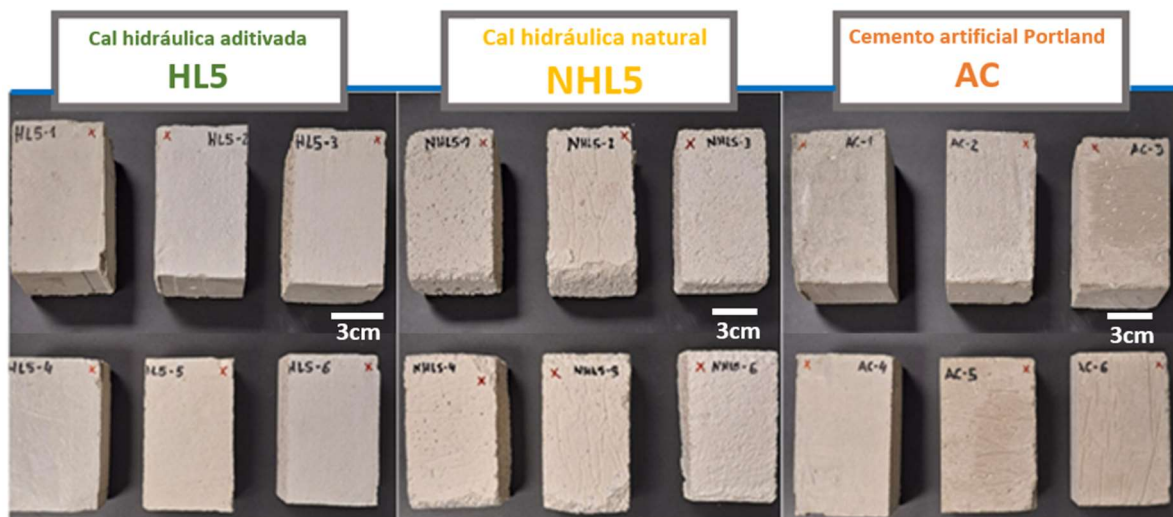


Figura 8. Imagen de las 18 probetas que se van a someter a estudio, todas ellas correctamente nombradas y con los ejes x-y-z marcados. Hay un total de 6 probetas por cada uno de los tres tipos de morteros hidráulicos a ensayar.

Estos morteros fueron realizados en el laboratorio de Petrofísica, del área de Mineralogía y Petrología, de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM. El mortero de cal hidráulica natural (NHL5) fue realizado en el mes de diciembre del año 2020, mientras que los de cal hidráulica aditivada (HL5) y cemento (AC) en el mes de abril del año 2021. La relación conglomerante: árido empleada fue de 2 : 3 para los tres tipos de morteros.

La nomenclatura inicial aplicada a estas probetas fue AC (cemento artificial), NHL5 (cal hidráulica natural) y HL5 (cal hidráulica aditivada), y según los ensayos de deterioro inducido sufridos fue; AC_H, NHL5_H y HL5_H, para la heladicidad con sales y AC_S, NHL5_S y HL5_S para las muestras sometidas a cristalización de sales.

4.2 Técnicas y ensayos

Los morteros se sometieron a una caracterización petrográfica, petrofísica y mecánica antes y después del deterioro inducido (ensayos de durabilidad o de envejecimiento acelerado). Para tal caracterización se emplearon una serie de técnicas y ensayos normalizados que se detallan a continuación y que están recogidas en la norma UNE-EN 17187 (2020).

4.2.1 Caracterización petrográfica

Con la finalidad de determinar aspectos importantes como pueden ser la composición mineralógica, las microestructuras o las texturas, se recurre a la caracterización petrográfica, donde se incluye también la mineralogía y la química. Establecer dichas características, las cuales van a definir su grado de calidad, va a resultar imprescindible para poder determinar la durabilidad de estos morteros.

Las técnicas petrográficas empleadas son complementarias entre sí, y son las siguientes:

- **Descripción macroscópica**: mediante una lupa de geólogo se identificarán los componentes del árido que conforman estos morteros, además del color, presencia de fisuras u oquedades, orientación de sus componentes, etc.
- **Microscopía óptica de luz polarizada (MOP)**: el microscopio empleado fue el modelo OLYMPUS BX51 U-LH100HG con una cámara digital, y software de captura y tratamiento de imagen *CellSens Entry V2* de *Olympus*. Se ha podido realizar un estudio detallado de la mineralogía, texturas y porosidad de la pasta y del árido. Estas características son muy importantes y determinantes en su proceso de degradación. Las láminas delgadas realizadas presentan un tamaño de 3 x 2 cm y un espesor de 30µm. Se realizaron 9 láminas delgadas, 3 iniciales y 3+3 después de los dos deterioros. Las láminas delgadas fueron realizadas en el taller de láminas del Área de Petrología en la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM).
- **Microscopía de fluorescencia (FL)**: es una técnica microscópica que complementa a la microscopía óptica de luz polarizada. Facilita la observación textural de una roca, destacando características tan importantes como la porosidad y su tipología. Utiliza el mismo microscopio óptico que la técnica anterior, pero en este caso, se le acopla una lámpara de mercurio Olympus U-RFL-T, como fuente de emisión de luz ultravioleta. Se emplean las mismas 9 láminas delgadas que para el MOP, aunque en su elaboración se tuvo que incorporar fluoresceína artificial para que rellenara la porosidad de las muestras. Esto no afectó a su estudio a través del MOP.
- **Difractometría de rayos X (DRX)**: para determinar las fases minerales bien cristalizadas de los morteros, se ha empleado la difracción de rayos X de 9 muestras en polvo, siguiendo la norma UNE-EN 13925-2 y 3 (2003, 2006). Se emplearon 2g de

muestra con tamaño de grano $<53 \mu\text{m}$. El difractómetro que se ha empleado es un *Bruker D8 Advance* con tubo de ánodo de Cuka y monocromador de grafito que trabaja en un rango de 2° - 65° y un intervalo de $0,02^\circ$ - $2^\circ/\text{min}$ de manera continua, perteneciente al Centro de Asistencia a la Investigación CAI de la Facultad de Ciencias Químicas (UCM). Se realizaron 9 difracciones.

- Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (ATD/TG): empleado para determinar el grado de carbonatación y estado químico de los componentes de estos morteros, cuando son calentados hasta los 1250°C (deshidratación, deshidroxilación y descarboxilación). El equipo que se ha empleado pertenece al CAI de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), sigue la norma ISO 11358-1 (2022) y se trata de un *SDT-Q600* con un software implementado *UA* de *TA Instruments*, que trabaja en atmósfera de oxígeno y con un caudal de $100\text{ml}/\text{min}$. La velocidad de calentamiento es de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Se realizaron 3 análisis térmicos a las 3 muestras en polvo iniciales.

4.2.2 Caracterización petrofísica

Para caracterizar petrofísicamente los tres morteros, y poder establecer así su grado de calidad y durabilidad, las técnicas a emplear se han agrupado en función de las propiedades intrínsecas (propiedades superficiales, dinámicas y estructurales), que se han querido analizar, así como de sus variaciones.

Las técnicas petrofísicas se han realizado mediante la prestación de los equipos necesarios por parte del Laboratorio de Petrofísica del Instituto de Geociencias-IGEO (UCM-CSIC).

Propiedades superficiales: con la finalidad de analizar variaciones en el aspecto superficial de las muestras antes y después de estar expuestos a agentes de degradación medioambiental inducida, se va a aplicar:

- Espectrofotometría (color): para analizar los parámetros de color de la superficie de las muestras y sus variaciones, se ha empleado el sistema CIELAB (1976) (Fig. 9) y la norma UNE-EN 15886 (2011). Los parámetros analizados son: la luminosidad (L), las coordenadas cromáticas (rojo: a^* , verde: $-a^*$, azul: $-b^*$, amarillo: b^*), la croma (C^*), el índice de blanco (IB), el índice de amarillo (IA), el cambio global de color (ΔE^*) y el brillo (ISO). El espectrofotómetro empleado es del modelo MINOLTA CM-700D/600D (Fig.10).

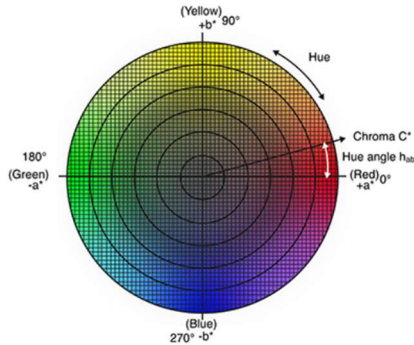


Figura 9. Sistema CIELAB (1976). Imagen tomada de: <https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entiendo-el-espacio-de-color-cie-lch/>



Figura 10. Realización de las medidas sobre la cara x de las muestras de mortero ensayadas con el espectrofotómetro KonicaMinolta CM-700D/600

Propiedades dinámicas: para evaluar la calidad y durabilidad de los morteros se va a determinar la velocidad de propagación de las ondas P (V_p) u ondas ultrasónicas a través de ellos y como interaccionan éstas con las distintas fases de estado; sólido, líquido y gaseoso (Benavente, 2006):

- **Propagación ultrasónica (V_p):** el tiempo de propagación de la onda a través del mortero, dependerá en gran medida de la densidad del material, su porosidad, su mineralogía, su textura, su grado de anisotropía, su contenido en agua y otros fluidos (Fort et al, 2008, 2011). El equipo de ultrasonidos empleado es un modelo PUNDIT LAB+ de Proceq con transductores de 250 kHz y 2,8 cm de diámetro (Fig.11). Las medidas se realizan enfrentando un par de transductores en los 3 ejes. Los ensayos de propagación ultrasónica (V_p) se realizan siguiendo la norma UNE-EN 14579 (2005).



Figura 11. Equipo PUNDIT LAB+ empleado.

- **Anisotropía:** a partir de las velocidades de las ondas P calculadas en el ensayo anterior, se procede al cálculo de la anisotropía (total: $dM\%$ y relativa: $dm\%$) mediante las fórmulas propuestas por Guydader y Dennis (Fort et al. (2008, 2011). Estos valores van a indicar en qué dirección espacial está concentrada la orientación estructural, textural y mineralógica que condiciona su anisotropía (Fort et al., 2008), factor que puede ser determinante para la calidad y durabilidad de los materiales, en caso de existir planos preferentes de degradación, no apreciables a simple vista.

$$dM = \left[1 - \left(\frac{2V_{pmin}}{V_{pmed} + V_{pmax}} \right) \right] \cdot 100 \quad dm = \left[1 - \left(\frac{V_{pmax} - V_{pmed}}{V_{pmax} + V_{pmed}} \right) \right] \cdot 100$$

Donde:

dM : Anisotropía total (%) y dm : Anisotropía relativa (%)

$V_{pmin}/med/max$ = Valores mínimo, medio y máximo de la velocidad de propagación de las ondas P (m/s)

Propiedades estructurales: para caracterizar la estructura interna de los morteros y estudiar su porosidad, se ha empleado:

- **Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM):** ejerciendo escalones de presión (hasta ~415MPa), se introduce mercurio en el sistema de poros de la muestra, obteniéndose una distribución de los tamaños de poro del material ensayado (Esbert et al., 1997). Algunos de los parámetros que se obtienen de este ensayo son la densidad real y aparente (kg/m^3), la porosidad total (%), la forma y tamaño medio de los poros, la distribución de los diferentes tamaños de poro, la relación macro/microporosidad, cuyo límite se establece a $5\mu\text{m}$ (Russel, 1927; Rodríguez y Sebastián, 1994; Fort et al., 2011), y la tortuosidad o morfología de las conexiones capilares. El porosímetro empleado es del modelo *Micromeritics Autopore IV*, con un rango de tamaños de poro de $0,001\text{-}500\mu\text{m}$ de diámetro, y las probetas destinadas a este ensayo han sido cortadas hasta obtener pequeño cilindro de 1cm de diámetro y $1,5\text{cm}$ de altura. Se han realizado 9 ensayos de PIM. Esta técnica sigue la norma ASTM D 4404-10 (2010).
- **Ensayo hídrico de saturación (SAT):** ensayo que determina el comportamiento de los materiales frente a la presencia del agua en estado líquido y bajo 2 kPa de presión. Con este ensayo se calculan las densidades reales y aparentes, el porcentaje de porosidad total, abierta y atrapada, el porcentaje de saturación y el índice de compacidad. Este ensayo se ha realizado siguiendo la norma UNE-EN 1936 (2007). La cámara de vacío empleada es una cámara para rocas RC-002 del proveedor Sistemas de Ensayo, S.L (Fig. 12).



Figura 12. Cámara de vacío empleada en el ensayo de saturación.

Las fórmulas empleadas en el ensayo de saturación son las siguientes:

$$Dr = \frac{Md}{(Md - Mh)} \text{ (según RILEM, 1980)} \quad Da = \frac{Md}{(Ms - Mh)} \cdot \rho_{\text{agua } 20^{\circ}\text{C}} \quad C = \frac{Da}{Dr}$$

$$Pa = \left[\frac{(Ms - Md)}{(Ms - Mh)} \right] \cdot 100 \quad Pt = \left[1 - \left(\frac{Da}{Dr} \right) \right] \cdot 100$$

$$Pr = Pt - Pa \quad Sat = \left[\frac{(Ms - Md)}{Md} \right] \cdot 100$$

Donde:

Md: Peso seco (g)

Ms: Peso saturado/húmedo (g)

Mh: Peso hidrostático (g)

Dr: Densidad real (kg/m^3)

Da: Densidad aparente (kg/m^3)

$\rho_{\text{agua a } 20^{\circ}\text{C}}$: $0,9998\text{ g/cm}^3$

C: Índice de compacidad (0-1)

Pa: Porosidad abierta accesible al agua (%)

Pt: Porosidad total (%)

Pr: Porosidad atrapada o retenida (%)

Sat: Saturación de agua (%)

4.2.3 Caracterización mecánica

En este grupo se engloban aquellos ensayos cuya finalidad es evaluar la resistencia que muestran los materiales a ser deformados o fracturados ante la aplicación de esfuerzos externos. Los morteros ensayados se someterán a:

- Resistencia al rebote; dureza superficial de Schmidt (R): se emplea un esclerómetro o martillo de Schmidt digital modelo *RockSchmidt Type L* de la marca Proceq, especialmente indicado para materiales blandos y/o meteorizados. La norma que sigue este ensayo es la ASTM D 5873-00 (2000). Las medidas obtenidas registran la energía o fuerza aplicada de un émbolo metálico retráctil al golpear sobre la superficie del material al ser propulsado por un muelle (Li et al., 2000). La resistencia al rebote de un material pétreo oscila entre los valores 0-70 unidades de Schmidt (R) (Rodríguez-Sastre et al., 2004) (Fig.13). Este equipo impacta con una fuerza de 0,73 Nm y la punta de impacto es de 1 cm, lo que abarca un campo de impacto polimineral.



Figura 13. Esquema de la resistencia al rebote de un material pétreo en unidades de Schmidt (R) y con su equivalencia cualitativa en dureza.

- Resistencia al microrrebote; dureza superficial de Leeb (L): este método se basa en el concepto de rebote dinámico, en el que un dispositivo portable (microdurómetro) con una punta de metal de 3mm y fuerza de impacto de 11Nmm (Fig.14), es propulsado contra la superficie de la probeta, y que al impactar genera una pérdida de energía cinética. En esta técnica el impacto se realiza principalmente sobre el conglomerante. El valor de la dureza superficial se expresa en unidades estándar de Leeb (HLD), que van de 0 a 1.000 HLD (Aoki et al. 2008). La norma que se ha empleado es la ASTM A-956 (1996), y el microdurómetro empleado es del modelo Equotip ®3 de la marca Proceq.



Figura 14. Toma de medidas de la resistencia al microrrebote con el microdurómetro Equotip ®3.

- Resistencia a la compresión simple uniaxial indirecta (RCS): se va a calcular de dos formas:

1) Mediante la correlación numérica propuesta por Deere y Miller (1966), se calculará de manera indirecta la resistencia a la compresión simple uniaxial, empleando los valores que se han obtenido del ensayo del martillo Schmidt (R) y los valores de densidad aparente ($\rho_{ap} = \text{g/cm}^3$) de cada probeta de mortero ensayada. De esta manera, se obtendrá un valor de RCS (MPa) que podrá ser interpretado mediante la Tabla de Clasificación ISMR (1981) y sus grados de meteorización (Tabla I).

Clase	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
RCS (MPa)	0.25 - 1	1 - 5	5 - 25	25 - 50	50 - 100	100 - 250	>250
Descripción	Extremadamente blanda	Muy Blanda	Blanda	Moderadamente dura	Dura	Muy dura	Extremadamente dura
Identificación en campo	Se puede marcar con la uña	Se desmenuza con el martillo o se talla con una navaja	Se marca con el martillo y cuesta tallar con la navaja	Se rompe con martillo pero no puede tallarse con la navaja	Se requiere más de un golpe para romperla con el martillo	Se requieren muchos golpes de martillo	Al golpearla con el martillo saltan esquirlas

Tabla I. Tabla de Clasificación ISMR (1981).

$$RCS (MPa) = 6,9 \cdot 10^{(0,0087 \cdot \rho \cdot R + 0,16)}$$

Donde: ρ : Densidad aparente (g/cm^3) y R: Resistencia al rebote (US).

2) También, se puede estimar de manera indirecta la resistencia a la compresión simple uniaxial (RCS), mediante la fórmula propuesta por Aoki y Matsukura (2008):

$$RCS (MPa) = 0,079 \times e^{0,039n} \times L^{1,1}$$

siendo n la porosidad total de la muestra (%) y L el valor obtenido de los impactos con Equotip (HLD).

- Resistencia a la perforación (DRMS): con este ensayo se pretende evaluar la resistencia que ofrecen los distintos tipos de morteros a ser taladrados. Mide la fuerza (N), con respecto a la penetración de la broca (Costa et al., 2010). Esta técnica se compone de un taladro del modelo Cordless DRMS (Fig.15) con dos motores para mantener la velocidad de rotación y de perforación constante. La broca empleada presenta un diámetro de 2,78mm, la velocidad de penetración establecida ha sido de 15mm/min, y la rotación de la broca es de 400 r.p.m. El equipo es un microdrilling o microperforador de la marca DRMS Sint Technology.



Figura 15. Imagen de la realización de un taladro a una de las probetas ensayadas con el *microdrilling*

4.3 Ensayos de durabilidad

Tras la primera fase de ensayos, la cual permitirá caracterizar los materiales y establecer su calidad, se procede a valorar su durabilidad realizando una serie de ciclos inducidos de degradación o envejecimientos acelerados que simulan la agresión de agentes medioambientales, como pueden ser las temperaturas extremas, el agua y la cristalización de sales. Una vez finalizados los ciclos de degradación, se vuelven a realizar la totalidad de técnicas y ensayos descritos en el apartado anterior (4.2) en una segunda fase, de tal manera que se pueda cuantificar sus variaciones.

4.3.1 Resistencia a la cristalización de sales

Permitirá evaluar la resistencia de los morteros a la cristalización de sales en su interior. La cristalización de sales ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$) junto a elevadas temperaturas, pretende simular condiciones ambientales más áridas, costeras y de fuerte evaporación, donde la penetración de agua cargada de sales en la porosidad de los materiales, puede generar estragos tanto en el aspecto, como en la resistencia y durabilidad de las estructuras en las que aparecen, ya que dan lugar a esfuerzos de rotura a través de las fisuras y provocan el deterioro o disgregación de estos. El ensayo se ha realizado empleando la norma UNE-EN 12370 (2020) y utilizando una solución de sal (mirabilita; $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$) al 12% (Fig.16). Se completaron un total de 25 ciclos de 24h.

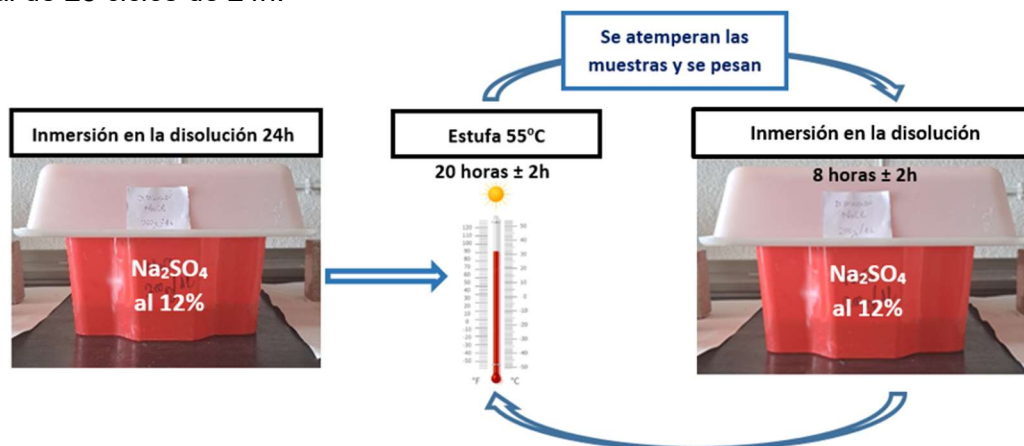


Figura 16. Ciclo esquemático del ensayo de deterioro por cristalización de sales.

4.3.2 Resistencia a la heladicidad con sales

La heladicidad con sales pretende simular condiciones invernales a las que pueden ser expuestos estos morteros, mientras que la adición de sales a estos ciclos de hielo-deshielo se debe a la práctica habitual de esparcir sal (NaCl) con el objetivo de bajar el punto de congelación del agua y evitar la formación de placas de hielo en calles y carreteras. El ensayo se ha realizado empleando la norma UNE-EN 12371 (2011) incorporando el uso de sal común (NaCl) al 20% (Fig.17). Se realizaron un total de 30 ciclos de 24h.

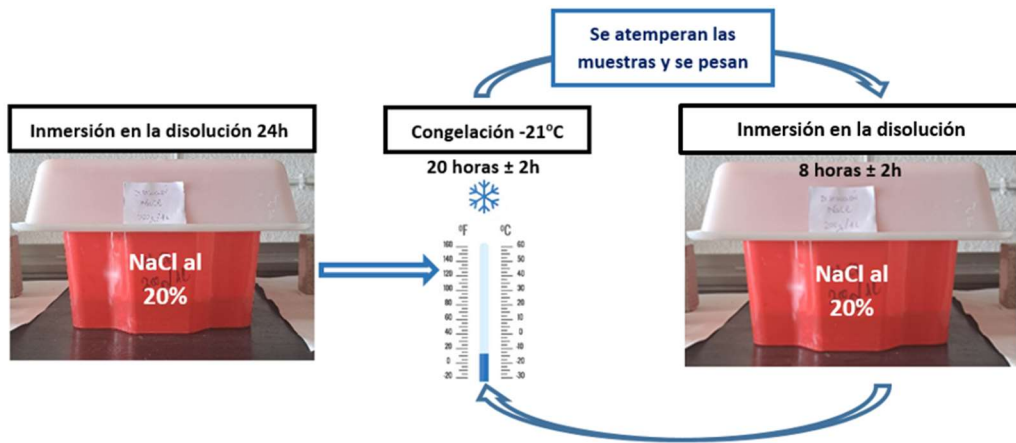


Figura 17. Ciclo esquemático del ensayo de deterioro por heladicidad con sales.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterización petrográfica

5.1.1 Descripción macroscópica

La descripción macroscópica se ha realizado haciendo uso de una lupa de geólogo (x8), y se ha realizado una comparativa entre las características iniciales previas de los tres morteros, y tras ser sometidos al deterioro inducido.

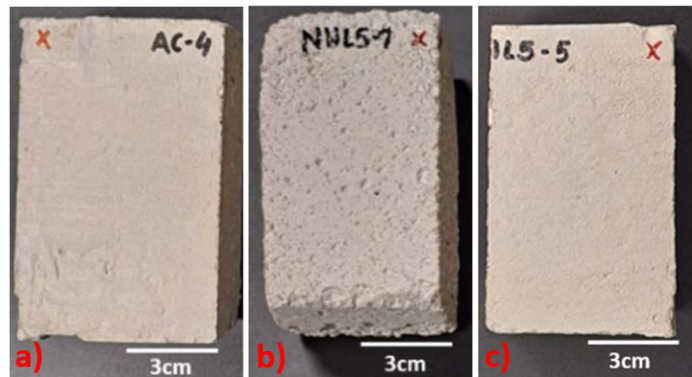


Figura 18. a) Mortero de AC. b) Mortero de NHL5 y c) Mortero de HL5.

En el caso del mortero de AC (Fig. 18a), se aprecia un color gris claro, sin apenas presencia de oquedades ni fisuras, salvo algún que otro macroporo disperso, como consecuencia del amasado. En cuanto al árido, su composición es principalmente de cuarzo, aunque también aparecen algunos fragmentos de roca natural (ígneas), muestra un tamaño arena gruesa-muy gruesa dominante (0,5-2 mm), y clastos angulosos.

El mortero de NHL5 (Fig. 18b), muestra un color blanco y un aspecto menos compacto y cohesionado que el anterior. Se aprecia algo de porosidad, el tamaño de poro no excede 0,5 mm de diámetro y no se observan fisuras. El árido es silíceo (100% cuarzo), de tamaño arena gruesa-muy gruesa dominante (0,5-2mm) y sub-anguloso

El mortero de HL5 (Fig. 18c), presenta un color gris-beige claro, con un aspecto a simple vista similar al mortero AC. Se ha observado algo de porosidad (<1mm) y algunas pequeñas fisuras entre clastos. En cuanto al árido, destaca una composición mayormente de cuarzo, con granos de tamaño arena gruesa-muy gruesa dominante (0,5-2 mm) y con clastos angulosos.

Se ha observado que los cambios sufridos tras los ensayos de deterioro inducido son mayores en aquellas probetas que han sido sometidas a cristalización de sales, destacando los casos de los morteros de AC y de HL5.

Para el mortero de AC, a partir del ciclo 12-13 del ensayo de cristalización de sales (Fig.19), se ha observado la aparición de grietas, en algunos de los casos de gran tamaño. También han aparecido descamaciones superficiales con pérdida de material asociado. Las grietas más representativas siguen un patrón bastante común en aquellos morteros que han sido sometidos al esfuerzo de cristalización de sales, surgiendo fisuras de manera concéntrica, a partir de un núcleo de rotura (Fig.19). En el caso del ensayo de heladicidad con sales, se ha

tenido que esperar hasta el ciclo 20-21 para observar ciertas alteraciones superficiales, como pequeñas fisuras en bordes y algo de pérdida de material en las aristas de algunas probetas.

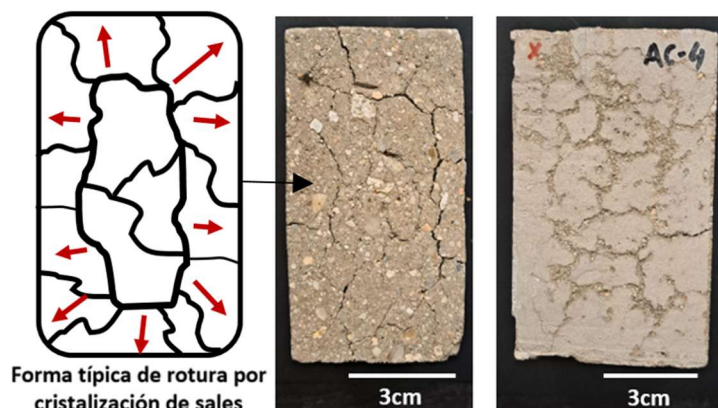


Figura 19. Fisuración concéntrica por cristalización de sales en el interior del mortero de AC (centro), descamaciones superficiales (derecha) y esquema simplificado de rotura típica por cristalización de sales (izquierda).

Tras la cristalización de sales, el mortero NHL5 (Fig. 20), apenas ha sufrido ninguna alteración, y a simple vista no han surgido ni fisuración, ni descamaciones, y lo único apreciable en algunas de las muestras es la formación de eflorescencias de sal deshidratada (thenardita) en su superficie. Tras el ensayo de heladicidad con sales, tan solo se observa una leve pérdida de material en aristas y bordes.

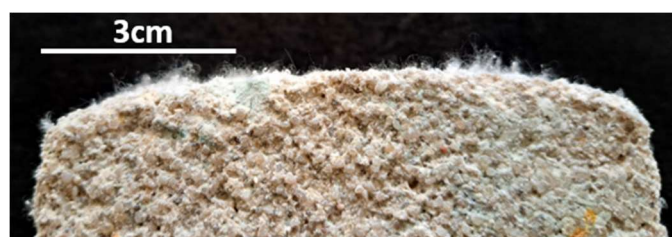
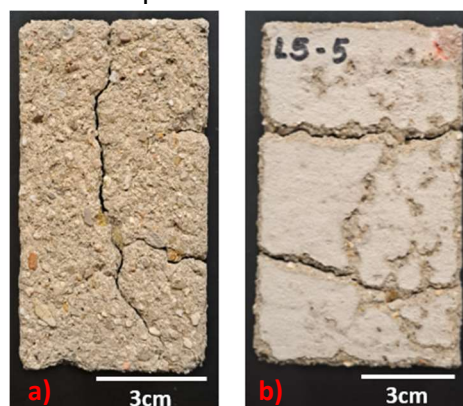


Figura 20. Eflorescencias de sal deshidratada (thenardita) en una probeta de NHL5 tras la cristalización de sales. Las probetas del mortero de HL5, también han respondido bastante mal tras los ensayos de cristalización de sales (Fig. 21), con efectos de deterioro apreciables a partir del ciclo 16-17. Han surgido grietas de gran tamaño (1 mm) que atraviesan por completo la probeta (longitudinal y transversalmente), además de un acentuado proceso de arenización (disgregación intergranular) y descamaciones en superficie. Tras el ensayo de heladicidad con sales, aparecen pequeñas grietas muy superficiales en torno a los bordes de las probetas.

Figura 21. Fisuración longitudinal (a) y transversal (b), de gran tamaño (ancho: 1mm), en una muestra de HL5 sometida a cristalización de sales.



5.1.2 Descripción microscópica

5.1.2.1 Microscopía óptica de luz polarizada (MOP) y de fluorescencia (FL)

Tras la realización de las láminas delgadas y observando las muestras de mortero bajo el microscopio de luz polarizada y de fluorescencia antes de ser sometidas al deterioro inducido, se ha podido caracterizar previamente la mineralogía y la textura del conglomerante y del árido, así como el tipo de porosidad presente en los tres morteros.

En el mortero de AC (Fig. 22), el conglomerante presenta una textura micrítica de cristales $<4\mu\text{m}$, densa y parcialmente carbonatada (masa con bajo nivel de birrefringencia a nícoles cruzados). En su interior, aparece un gran número de pequeños agregados cristalinos en racimo de color oscuro y donde se identifican minerales de los tipos silicatos cálcicos (alita y belita) y aluminatos cálcicos (celita y felita), que son indicadores de su hidráulicidad (Fig.23).

El árido es heterométrico ($<2\text{mm}$), con bordes angulosos y composición mayormente silícea (cuarzo y feldespatos), aunque con algunos fragmentos de rocas plutónicas. Aparecen bordes de corrosión química en los granos, indicando que el conglomerante se ha adherido perfectamente al árido y está reaccionando. La porosidad que presenta el conglomerante es mayoritariamente de tipo vacuolar, con tamaños de hasta $\varnothing = 3-4 \text{ mm}$ y en ocasiones son poros no conectados entre sí. También parece algo de porosidad fisural, pero presente sobre todo en los bordes de los clastos. Por otra parte, con la microscopía de fluorescencia se ha observado que toda la pasta y parte del árido (feldespatos), es fluorescente, indicando un elevado porcentaje de microporosidad.

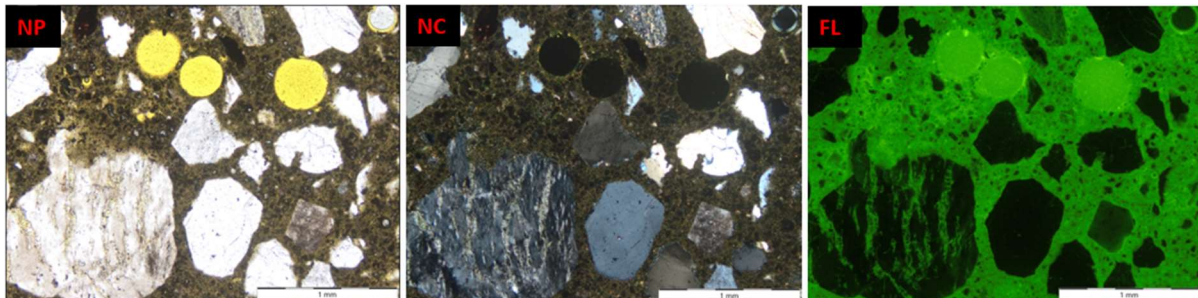


Figura 22. Imagen al microscopio de luz polarizada (MOP) y de fluorescencia (FL) del mortero de AC, antes del deterioro inducido. NP (nícoles paralelos), NC (nícoles cruzados), FL (fluorescencia). Escala 1mm.

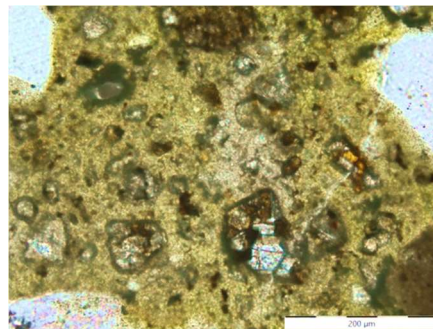


Figura 23. Imagen MOP (modo nícoles paralelos) de los agregados cristalinos típicos de los cementos. Escala 200 μm .

En el mortero del NHL5 (Fig. 24), de nuevo el conglomerante está formado por una masa microcristalina con agregados de silicatos cálcicos y nódulos de carbonatación. El grado de carbonatación de este conglomerante es mayor que en el caso anterior (mayor birrefringencia). Los agregados de silicatos-cálcicos aparecen en menor concentración que en el caso del mortero de AC (Fig. 25). El árido es sub-anguloso, de composición totalmente silíceo (cuarzo) y con tamaños bien seleccionados de grano entre 0,5 y 2mm (arena gruesa-muy gruesa). La porosidad es de tipo vacuolar, aunque hay más abundancia de porosidad fisural debido a los procesos de retracción durante el fraguado, que es más lento que en los morteros de cemento. La microporosidad abunda en la pasta, observable gracias a la impregnación con fluoresceína (Fig. 24).

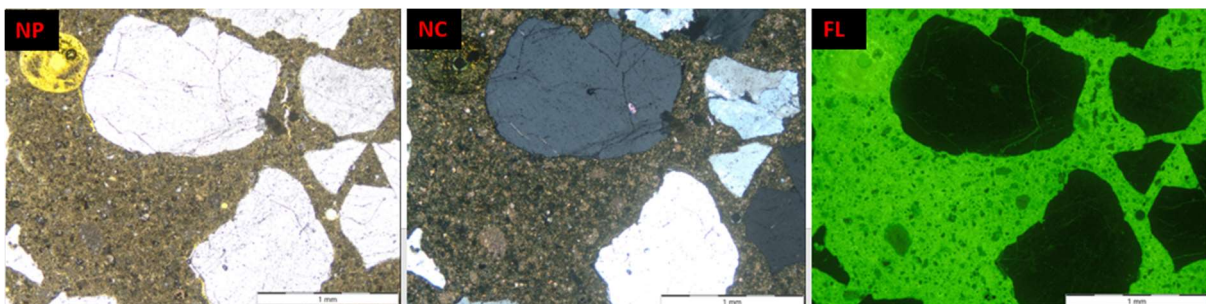


Figura 24. Imagen al microscópio de luz polarizada (MOP) y de fluorescencia (FL) del mortero de NHL5, antes del deterioro inducido. NP (nícoles paralelos), NC (nícoles cruzados), FL (fluorescencia). Escala 1mm.

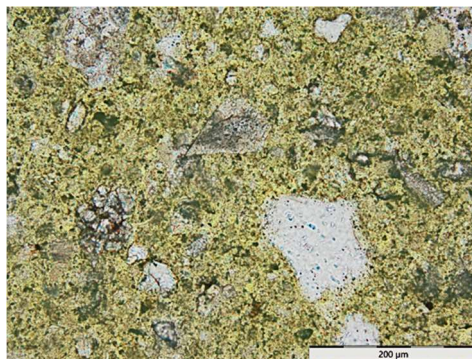


Figura 25. Imagen MOP (modo nícoles paralelos) de los agregados cristalinos típicos de las cales hidráulicas naturales. Escala 200µm.

En el mortero de HL5 (Fig. 26), se ha empleado un árido heterométrico (<2mm), con morfología angulosa, composición mayormente silíceo (cuarzos y feldespatos), y con bordes de corrosión química, igual al del mortero de AC. El conglomerante de textura micrítica está parcialmente carbonatado y contiene menos agregados de silicatos cálcicos (colores oscuros) que en el caso del mortero de AC. También presenta mucha más porosidad vacuolar que los anteriores morteros. Con la fluorescencia, se aprecia la microporosidad presente en el conglomerante, y las fisuras presentes en algunos de los clastos (feldespatos).

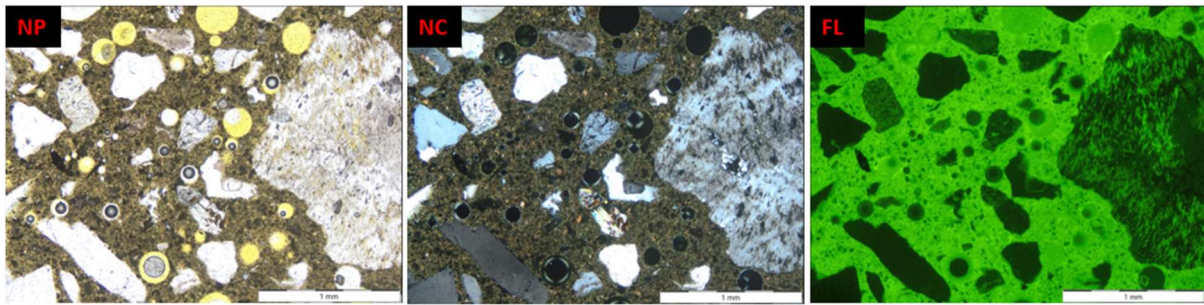


Figura 26. Imagen al microscopio de luz polarizada (MOP) y de fluorescencia (FL) del mortero de HL5, antes del deterioro inducido. NP (nícoles paralelos), NC (nícoles cruzados), FL (fluorescencia).

Posteriormente, se ha realizado un análisis de las láminas delgadas que se elaboraron tras los ciclos de deterioro inducido, con la finalidad de observar bajo ambos microscopios los efectos de la heladicidad con sales y de la cristalización de sales sobre los tres morteros estudiados (Fig. 27).

En el caso del mortero de AC que ha sido sometido a heladicidad con sales (Fig. 27-I,a), cerca de la superficie aparecen algunas fisuras interconectadas que afectan, tanto al conglomerante como al contacto con el árido. En el conglomerante disminuye la microporosidad por la precipitación del NaCl en su interior. También, esta sal aparece como pequeños agregados (escamas), poco representativos en su superficie y en el interior de algunos poros circulares (cristales aciculares $<15\mu\text{m}$). Sin embargo, para el caso del mortero de AC sometido a cristalización de sales (Fig. 27-II,a), aparecen fisuras muy grandes de hasta $170\mu\text{m}$ de ancho, y ramificadas, afectando a la totalidad de la lámina y generando la disgregación del mortero. En superficie aparecen algunas sales cristalizadas en forma de costras y escamas, así como tapizando el interior de algunos poros circulares en su interior.

En el mortero de NHL5 sometido a heladicidad con sales (Fig. 27-I,b), se aprecia en superficie (primeros 2-3mm) procesos de descohesión intergranular y disolución del propio conglomerante, que evoluciona a fisuras debido a los efectos de las sales precipitadas y del hielo. Los efectos de la heladicidad no se han llegado a detectar en profundidad. En el caso del mortero de NHL5 sometido a cristalización de sales (Fig. 27-II,b), la muestra no se ve muy afectada, observándose alguna pequeña fisura esporádica y algunas acumulaciones de sales en superficie o bajo ella, pero sin mayores daños en su interior.

En el mortero de HL5 sometido a heladicidad con sales (Fig. 27-I,c), se han podido observar fisuras y acumulaciones de sal en superficie (han penetrado hasta 0,5 mm). Las fisuras aparecen de manera aleatoria y generando descamados en superficie. Sin embargo, de cara a la cristalización de sales (Fig.27-II,c), se ha observado que los efectos a nivel microscópico son mayores, habiendo presencia de fisuras en todas direcciones y de mayor tamaño, con presencia de sales en su interior. La porosidad vacuolar ha estallado como consecuencia de

la cristalización de las sales, y se ha producido una descohesión intergranular completa, separándose el árido del conglomerante.

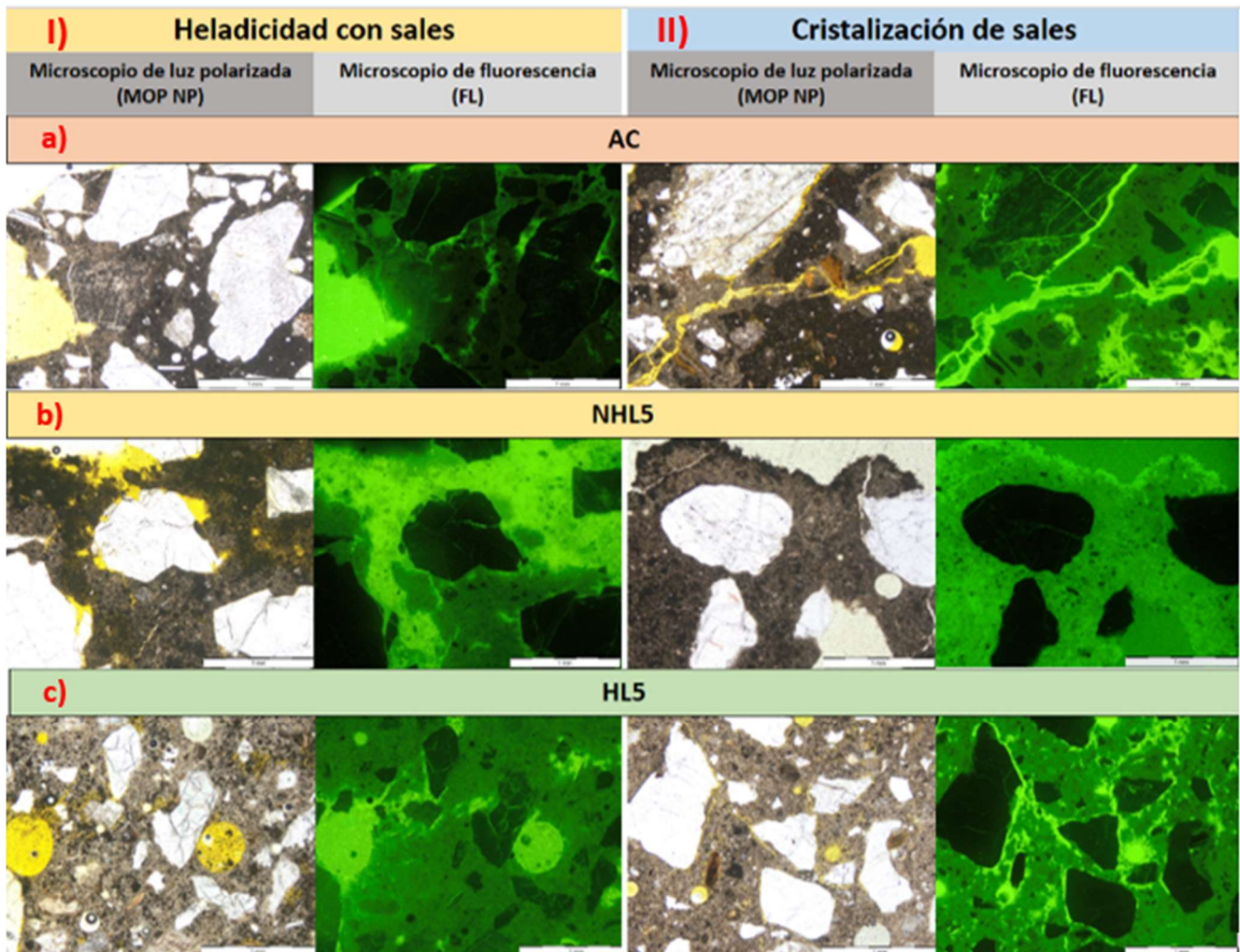


Figura 27. Imágenes al microscopio de luz polarizada (NP; nicoles paralelos) y de fluorescencia (FL) para los tres tipos de morteros estudiados; a) AC, b) NHL5 y c) HL5, tras ser sometidos a sendos ensayos de deterioro inducido I) heladicidad con sales y II) cristalización de sales. Escala 1mm.

5.1.3 Análisis químicos y térmicos

5.1.3.1 Difractometría de rayos X (DRX)

La composición de los morteros, según los difractogramas de rayos X (Fig. 28), recoge las fases minerales presentes, tanto en el árido como en el conglomerante, así como aquellas fases minerales residuales debidas a las sales incorporadas durante los ensayos de deterioro inducido. Es una técnica que complementa a la técnica de microscopía óptica (MOP) anterior.

En el mortero de AC (Fig. 28a), se observa como mineral dominante el cuarzo, que junto a los feldespatos (microclina y anortita) y las micas (biotitas y cloritas) son los componentes principales del árido presente en este mortero. Asociado al conglomerante, aparece la portlandita que es el hidróxido cálcico indicativo de que el mortero todavía está fraguando, la calcita que es producto de la carbonatación del mortero. La hidráulica de este mortero se refleja por la presencia de distintos tipos de silicatos y aluminatos cálcicos, como son la alita

(silicato tricálcico- C_3S), que es característica de los conglomerantes artificiales más hidráulicos, la belita (silicato bicálcico- C_2S), la celita (aluminato tricálcico- C_3A) y la kilchoanita (bisilicato tricálcico- C_3S_2). También, hay presencia de los sulfatos (etringita y yeso), característicos de los cementos artificiales.

En el mortero de NHL5 (Fig. 28b) se detectan algunas diferencias. Primero, el cuarzo es el único componente del árido, y la calcita, que es más abundante que en los morteros de AC y HL5, forma parte de la carbonatación de este conglomerante. Sigue apareciendo la portlandita debido a que todavía continúa su proceso de fraguado. En este caso, la hidráulica de este conglomerante natural viene indicada por la presencia de la gehlenita (silicato Al-Ca) y la belita (C_2S), indicativos de T^a de fabricación $<1200^\circ C$.

En el mortero de HL5 (Fig. 28c), la mineralogía que aparece es la misma que en el mortero de AC, y aunque es una mezcla de NHL5+AC (20%), esta técnica no permite su distinción. Los componentes minerales del árido son los mismos que en el caso anterior (cuarzo, microclinas, anortitas, biotitas y cloritas). También coinciden los del conglomerante, aunque aquí aparece la wollastonita que igualmente es un silicato cálcico (CS).

Tras los ensayos de deterioro inducido, en los difractogramas aparece como mineralogía nueva, las sales utilizadas en sendos ensayos. Después de los ensayos de cristalización de sales, aparece la thenardita (Na_2SO_4), que es la fase anhidra de la mirabilita ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) empleada. Además, en el caso del mortero de HL5, el yeso aumenta su presencia. Sin embargo, tras la heladicidad con sales, la presencia de la halita utilizada en el ensayo se hace muy notoria en los morteros de HL5 y NHL5 (indicativo de su mayor poder de retención). También, los morteros de AC y NHL5 presentan altos contenidos en yeso, debido posiblemente a una contaminación externa.

Del mismo modo, en todos los casos, la portlandita ha desaparecido, lo que indica que en los 3 morteros ha concluido el proceso de fraguado, después de los ensayos de deterioro.

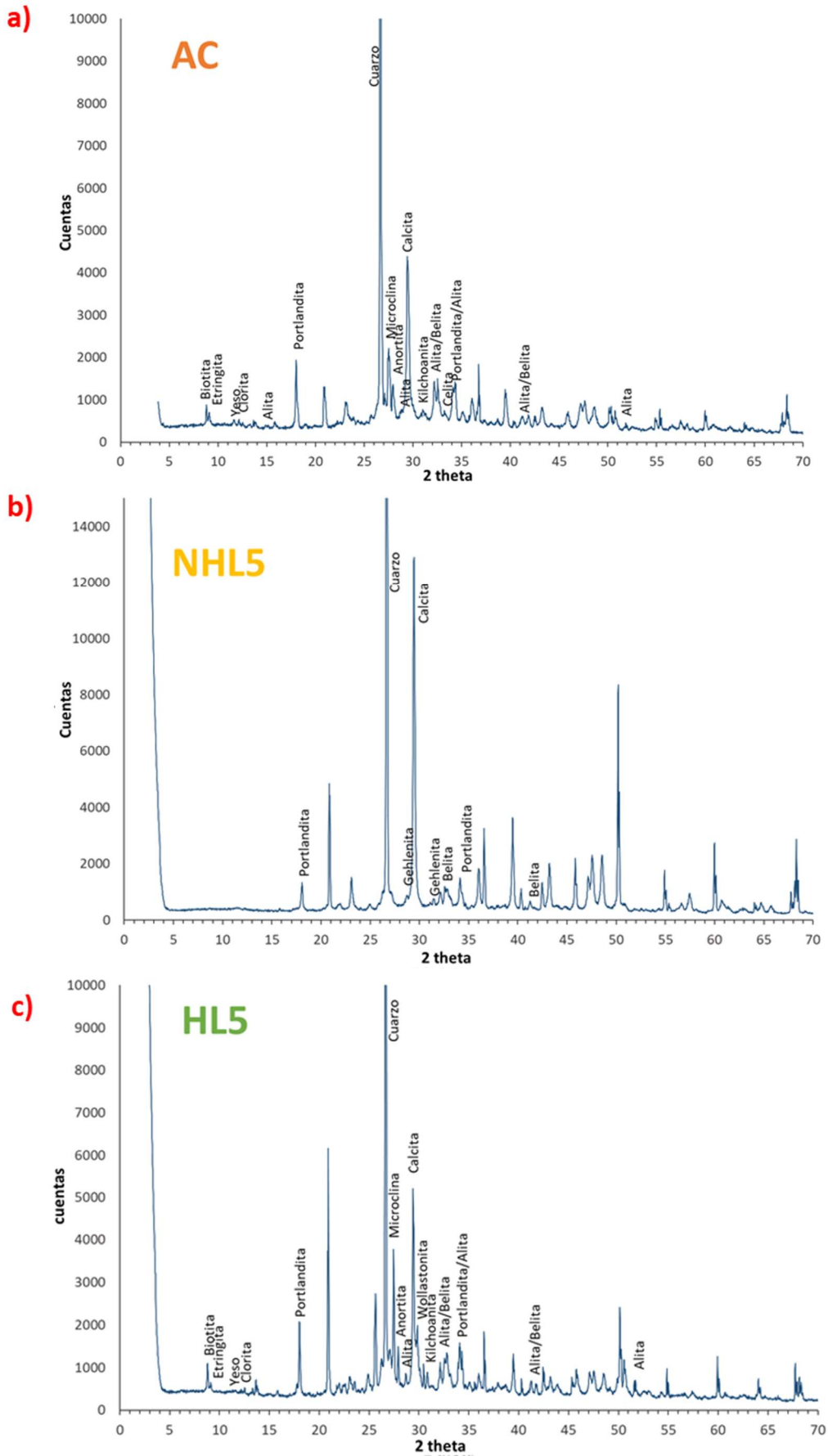


Figura 28. Difractogramas de la fracción polvo total de los tres morteros estudiados; a) AC, b) NHL5 y c) HL5, en los que aparecen marcadas las fases minerales de los picos más representativos, antes de los ciclos de deterioro.

5.1.3.2 Análisis térmico diferencial y termogravimétrico (TD-TG)

Esta técnica ha permitido evaluar el grado de hidratación y carbonatación de los tres morteros estudiados. Mediante el análisis térmico diferencial se han establecido los intervalos de temperaturas en los que suceden los procesos de deshidratación de las muestras (pérdida de H₂O), deshidroxilación (pérdida de grupos OH) y descarboxilación (pérdida de CO₂), asociados los dos primeros procesos al grado de hidratación, y el tercer proceso al grado de carbonatación, presentes en los diversos morteros. Mediante el análisis termogravimétrico, se ha cuantificado el porcentaje de pérdida en peso (%) en cada uno de los procesos, como se observa en la Tabla II.

Muestra	<200 °C		200 - 500 °C		500 - 800 °C		>800 °C		Pérdida total de peso (%)
	FASE DE DESHIDRATACIÓN		FASE DE DESHIDROXILACIÓN		FASE DE DESCARBOXILACIÓN		FASE LÍQUIDA		
	Pérdida de H ₂ O		Pérdida de grupos OH		Pérdida de CO ₂				
	T ^a (°C)	% de pérdida en peso	T ^a (°C)	% de pérdida en peso	T ^a (°C)	% de pérdida en peso	T ^a (°C)	% de pérdida en peso	
AC	<200	3,76	423,1 °C	3,34	704,01 °C	8,26	1227,5 °C	1,45	17,39
NHL5	<200	1,76	419,6 °C	2,92	720 °C	14,96	1152,6 °C	1,00	20,64
HLS	<200	1,66	422,4 °C	2,39	699,7 °C	7,60	1161,9 °C	0,96	12,61

Tabla II. Intervalos de temperaturas (TD) y porcentajes de pérdida en peso (TG) para los tres tipos de morteros estudiados.

En la fase de deshidratación (T^a < 200°C), la pérdida de agua se asocia a la desaparición de fases minerales hidratadas presentes en estos morteros y cuyo % de pérdida en peso es mayor en el caso del mortero de AC, ya que aquí se detecta la etringita (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O) a 74°C y el yeso (CaSO₄·2H₂O) a 126°C, sulfatos típicos de este tipo de morteros.

En la fase de deshidroxilación (T^a 200-500°C), la pérdida de grupos OH se asocia a la desaparición de la portlandita (CaOH₂ – proceso de fraguado), siendo mayor la pérdida en peso (%) para el mortero de AC, seguida del mortero de NHL5.

En la fase de descarboxilación (T^a 500-800°C), la pérdida del CO₂ se asocia a la descomposición de la calcita (CaCO₃ – proceso de endurecimiento), responsable de la carbonatación. Esta fase es destacable en el mortero de NHL5, con hasta un 15% de pérdida en peso.

Por último, destacar que en la fase líquida (T^a > 800°C), momento en el que las fases minerales comienzan a fundirse, el % de pérdida en peso es pequeño, destacando el mortero de AC con un 1,5% a partir de 1230°C.

En cuanto a la pérdida en peso total debida a la desaparición progresiva de las diversas fases minerales con el aumento de la temperatura, se aprecia que es mortero de NHL5 el que más pérdida sufre con casi un 21% de su peso inicial, indicando la presencia de una fuerte composición carbonática.

Tras los procesos de deterioro inducido, destaca que ha podido apreciarse un aumento en el proceso de descarboxilación y un descenso en la deshidroxilación, debido al aumento en la calcita por la carbonatación y el endurecimiento de los morteros.

5.2 Caracterización petrofísica antes y después del deterioro inducido

5.2.1 Propiedades superficiales

5.2.1.1 Espectrofotometría

El uso del espectrocolorímetro ha servido para cuantificar las variaciones de color que han sufrido las probetas tras los ensayos de deterioro inducido. En la tabla III se observan los parámetros de color obtenidos.

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO							
Muestra	L*	a*	b*	C*	IB	IA	Brillo(ISO)
AC	69,84 ± 25,4	0,73 ± 0,3	6,19 ± 2,0	6,23 ± 2,1	17,02 ± 8,5	14,67 ± 3,2	33,10 ± 8,7
NHL5	85,15 ± 1,2	0,64 ± 0,1	6,28 ± 0,8	6,32 ± 0,6	38,77 ± 4,9	10,52 ± 1,3	59,89 ± 2,9
HL5	81,19 ± 0,9	0,02 ± 0,2	4,69 ± 1,0	4,70 ± 1,0	39,71 ± 3,2	8,17 ± 1,7	54,36 ± 1,1
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO							
HELADICIDAD CON SALES							
AC_H	65,96 ± 4,4	1,40 ± 0,2	7,30 ± 1,0	7,44 ± 1,1	14,43 ± 3,8	14,98 ± 2,0	30,61 ± 4,9
NHL5_H	77,26 ± 2,2	1,66 ± 0,2	7,73 ± 0,9	7,91 ± 0,9	23,3 ± 5,1	13,98 ± 1,8	45,33 ± 3,9
HL5_H	75,47 ± 3,2	0,79 ± 0,2	5,88 ± 1,1	5,93 ± 1,1	28,20 ± 7,4	10,96 ± 2,3	44,28 ± 5,7
CRISTALIZACIÓN DE SALES							
AC_S	65,49 ± 6,6	1,33 ± 0,6	6,33 ± 3,0	6,47 ± 3,1	18,3 ± 13,3	13,38 ± 6,6	31,36 ± 9,0
NHL5_S	80,81 ± 3,8	1,95 ± 0,7	9,33 ± 1,6	9,54 ± 1,6	21,62 ± 9,3	16,15 ± 3,1	49,81 ± 7,3
HL5_S	74,95 ± 4,3	0,57 ± 0,3	7,10 ± 1,3	7,13 ± 1,3	23,35 ± 5,7	13,11 ± 2,3	42,64 ± 6,1

Tabla III. Parámetros de color de los morteros estudiados antes y después de ambos ensayos de deterioro inducido (heladicidad con sales y cristalización de sales) en valores medios y junto a sus desviaciones estándar.

Los tres morteros hidráulicos estudiados presentan cambios poco significativos en el color, siendo destacable el comportamiento inalterado del mortero de AC (tabla III). Originalmente, son morteros sin color por lo que los valores de la croma C* ($C^* \leq 6$) son bajos, especialmente el HL5. También los valores de las coordenadas cromáticas a* y b* reflejan esta tendencia, pues en general son valores bajos, donde los valores de a* (rojo) están próximos a cero ($a^* \sim 0$), y donde los valores de b* (amarillo) se encuentran en torno a 5 ($b^* \sim 5$). Sin embargo, en cuanto a la luminosidad L*, ésta es elevada ($70 \geq L^* \leq 90$), indicando que son morteros luminosos y claros, destacando el mortero de cemento (AC) como el más oscuro de los tres. En cuanto, a los índices de blancura (IB) y amarilleamiento (IA), cabe indicar que los mayores valores de IB son para los morteros de cales hidráulicas, HL5 y NHL5 ($IB \sim 40$), mientras que el índice de amarilleamiento (IA) es similar para los tres tipos, siendo algo más elevado en el caso del mortero de AC. Por último, en cuanto al brillo, comentar que los valores más bajos los presentan los morteros de AC. Aunque los tres morteros al presentar valores entre 10 y 70, son considerados por norma ISO, materiales semibrillantes o de brillo medio.

Después de sendos ensayos de deterioro, los cambios cromáticos sufridos son escasos (tabla III), siendo despreciables para el caso de los morteros de AC. Siguen siendo morteros sin color, aunque sus coordenadas cromáticas (a^* , b^* y C^*) aumentan levemente, siendo después de la cristalización de sales, y en el caso del mortero de NHL5, donde más se nota ese ligero aumento (Fig. 30). Los cambios más reseñables reflejan una pérdida de luminosidad ($L^* < 10\%$), blancura ($IB < 45\%$) y brillo ($< 27\%$) en los morteros de cal hidráulica (HL5 y NHL5) después de ambos ensayos (Figs. 29 y 31), principalmente después de la cristalización de sales, el cual provoca además un aumento en su amarilleamiento (IA) de hasta el 60% (tabla III).

La figura 29, confirma los resultados expuestos en la tabla III. Tras los ensayos de deterioro, las muestras tienden a perder luminosidad (L^*), sin embargo, los valores de la croma (C^*) aumentan levemente, siendo más destacable ese aumento para aquellas probetas sometidas a cristalización de sales (Fig. 29b). Los valores que presentan las probetas del mortero AC son bastante dispersos.

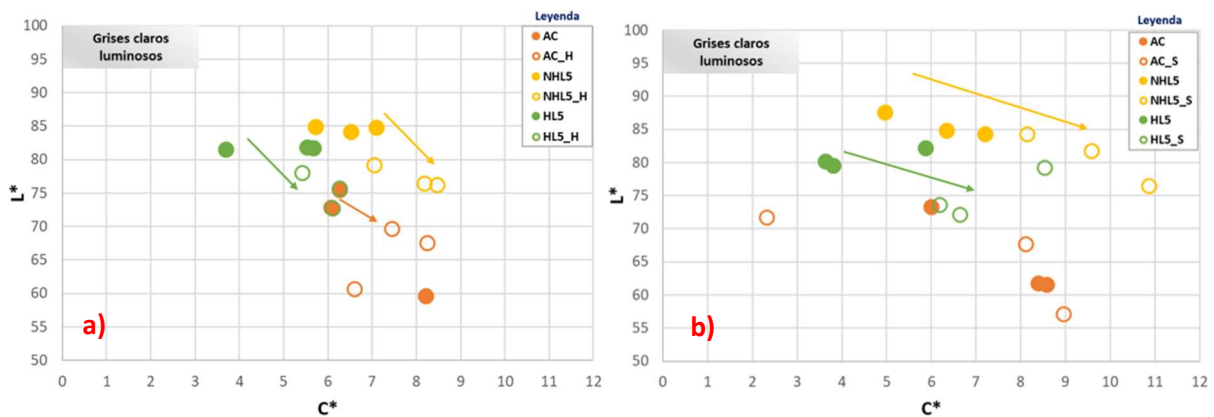


Figura 29. Relación entre los parámetros de L^* (luminosidad) y C^* (croma) tras los ensayos de heladicidad con sales (a) y de cristalización de sales (b).

En la figura 30 se puede apreciar cómo tras los ensayos de deterioro, los valores de las coordenadas cromáticas (a^* y b^*) aumentan levemente. Ese aumento es ligeramente mayor para el caso de las probetas sometidas a cristalización de sales (Fig. 30b).

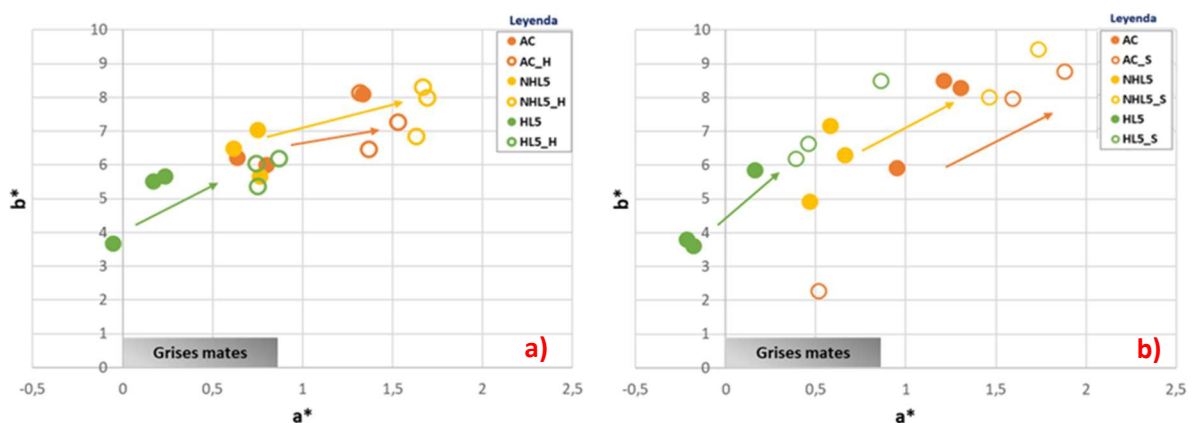


Figura 30. Relación entre las coordenadas cromáticas a^* y b^* , que determinan la cantidad de estímulo luminoso juzgado como rojo o amarillo, tras los ensayos de heladicidad con sales (a) y cristalización de sales (b).

También se puede apreciar en la figura 31 como los morteros tras la degradación inducida tienden a presentar unos índices de amarilleamiento (IA) más elevados y, sin embargo, los índices de blanqueamiento (IB) se ven reducidos, por lo que amarillean perdiendo su blancura original. Los valores que presentan las probetas del mortero AC son bastante dispersos.

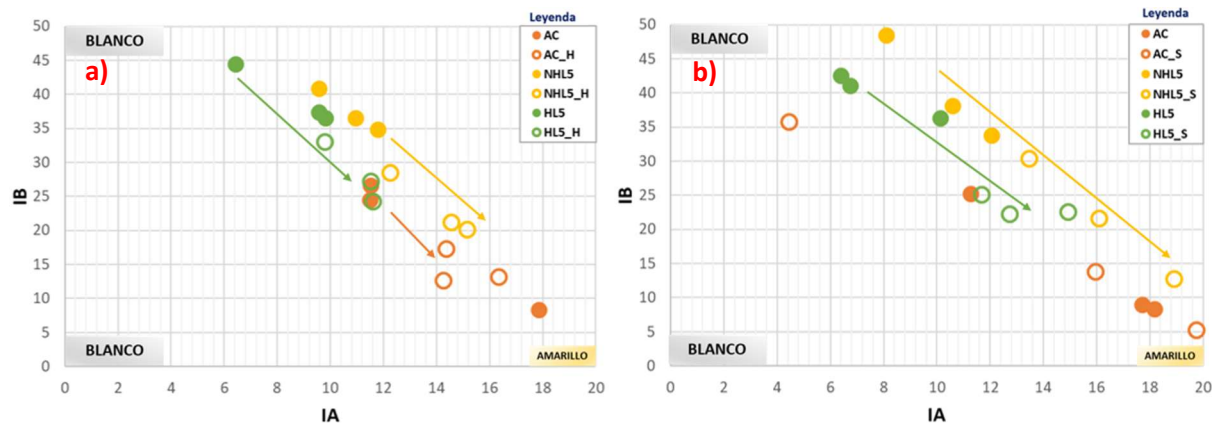


Figura 31. Gráficos de la relación entre los parámetros IA (índice de amarilleamiento) y IB (índice de blanqueamiento) tras los ensayos de heladicidad con sales (a) y cristalización de sales (b).

En la Tabla IV se puede apreciar como el cambio global de color ΔE^* afecta más a los morteros de NHL5 que fueron sometidas a ensayos de heladicidad con sales, mientras que para el ensayo de cristalización de sales afecta más a los morteros de HL5. Por el contrario, los morteros de AC después de ambos ensayos presentan valores <5 por lo que tales cambios de color son insignificantes, es decir, que no son perceptibles al ojo humano (Grossi et al, 2007, Cultrone y Sánchez-Ibáñez, 2018).

Muestra	Cambio global de color (ΔE^*)	
	Heladicidad con sales	Cristalización de sales
AC	4,09	4,39
NHL5	8,08	5,46
HL5	5,90	6,72

Tabla IV. Cambio global de color (ΔE^*) de los tres morteros hidráulicos estudiados tras los ensayos de deterioro.

5.2.2 Propiedades dinámicas

5.2.2.1 Propagación Ultrasónica (V_p) y Anisotropías (dM y dm)

Se han hallado los valores de velocidad de las ondas P (V_p) y el grado de anisotropía total (dM) y relativa (dm) de los tres tipos de morteros estudiados, tanto en las condiciones iniciales, como después de los ensayos de durabilidad (Tabla V).

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO			
Muestra	Vp (m/s) media	Anisotropía total (dM) %	Anisotropía relativa (dm) %
AC	2383,41 ± 187,3	24,06 ± 6,5	16,31 ± 2,3
NHL5	2205,30 ± 65,4	5,46 ± 1,6	3,85 ± 1,5
HL5	2157,03 ± 379,5	3,86 ± 2,5	2,32 ± 1,7
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO			
HELADICIDAD CON SALES			
AC_H	2589,72 ± 179,6	25,40 ± 3,7	17,79 ± 2,2
NHL5_H	2395,60 ± 47,9	7,65 ± 2,3	5,88 ± 2,8
HL5_H	2454,87 ± 524,0	4,76 ± 1,2	3,26 ± 0,9
CRISTALIZACIÓN DE SALES			
AC_S	2032,90 ± 46,5	30,00 ± 9,5	24,91 ± 9,9
NHL5_S	2682,54 ± 96,3	7,91 ± 3,9	4,44 ± 1,7
HL5_S	2339,71 ± 314,0	15,10 ± 12,9	11,82 ± 9,8

Tabla V. Valores medios de Vp, anisotropía total (dM) y relativa (dm) junto a sus desviaciones estándar de los tres tipos de morteros, antes y después del deterioro inducido.

Dichos valores aparecen recogidos en la Tabla V, en la que se puede apreciar como el mortero de cemento AC muestra una Vp algo más alta que los morteros de cal hidráulica (HL5-NHL5), aunque en todos los casos superan los 2000 m/s. El mortero de AC destaca por su alta anisotropía, tanto total (dM) como relativa (dm). Además, la diferencia que existe entre ambas anisotropías indica que estas probetas son texturalmente heterogéneas mostrando una clara dirección preferente de anisotropía que puede ser aprovechado para su deterioro. Por el contrario, los morteros de cales hidráulicas, muestran valores de anisotropía similares y muy bajos, indicando que son morteros poco anisótropos y más homogéneos texturalmente que el mortero de AC.

Después de los ensayos de deterioro (tabla V), las Vp aumentan en los tres morteros por la presencia de las sales de los dos ensayos, en su interior. Solo el mortero de AC, después de la cristalización de sales, ha bajado su Vp rondando los 2000 m/s, por el gran número de fisuras que presenta al final de este ensayo. Las anisotropías de los tres morteros aumentan ligeramente, aunque varían poco respecto a sus valores iniciales salvo en algunas excepciones. Se puede observar como la cristalización de sales es el ensayo que más anisotropía aporta a las probetas. Destaca, el aumento de la anisotropía relativa (dm) en el mortero AC, acercándose a los valores de anisotropía total (dM), lo que indica que la sal precipita rellenando la dirección preferente de anisotropía que tenía inicialmente y homogeneizando su textura. Además, también es destacable cómo el mortero de HL5 se ha hecho más anisótropo.

La relación entre la velocidad de las ondas P y la anisotropía total se muestra en la figura 32. En ella se puede observar cómo las probetas del mortero de AC se desmarcan de las probetas de cales hidráulicas (HL5 y NHL5). Además de forma general, los valores de Vp aumentan tras ambos ensayos de degradación, debido principalmente a la cristalización de sales en su

interior. También los valores de anisotropía total y relativa aumentan ligeramente, pero no es muy destacable. Después del ensayo de cristalización de sales destacan dos probetas que han presentado un elevado deterioro (AC-4 y HL5-5), con una disminución drástica de Vp y un aumento considerable de anisotropía (dM %, Fig. 32b).

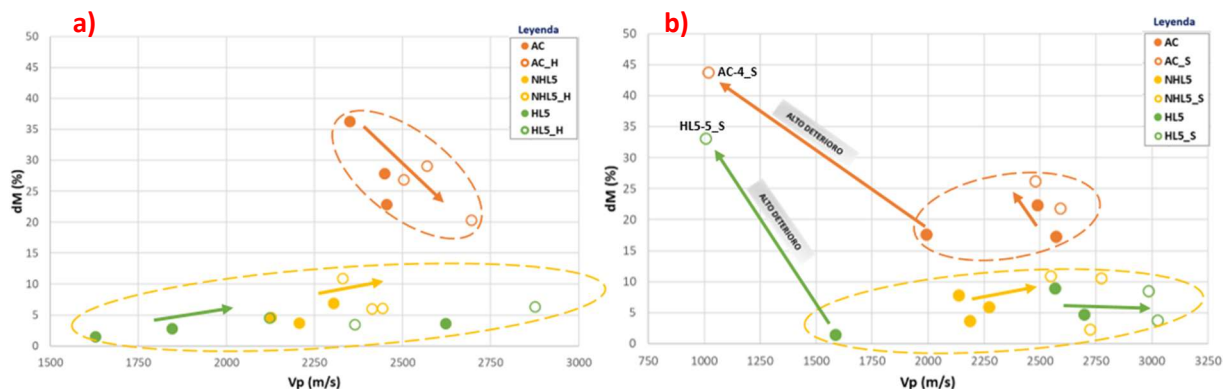


Fig.32. Relación entre velocidad de propagación ultrasónica Vp (m/s) y la anisotropía total dM (%) tras los ensayos de heladicidad con sales (a) y cristalización de sales (b).

5.2.3 Propiedades estructurales

5.2.3.1 Porosimetría por intrusión de mercurio (PIM)

Los parámetros obtenidos tras la porosimetría por intrusión de mercurio se recogen en la tabla VI, en la que se observa que las densidades reales (ρ_{real}) de los morteros estudiados están entre 1900 y 2500 kg/m³, siendo menor esa densidad en el mortero de HL5.

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO										
Muestra	Densidades		Parámetros de poro						Distribución porosimétrica	
	Densidad real ρ_{real} (kg/m ³)	Densidad aparente ρ_{ap} (kg/m ³)	Porosidad total (%)	Superficie específica (m ² /g)	Diámetro medio (μ m)	Forma de los poros	Tamaño medio (μ m)	Tortuosidad capilar (1-línea recta)	Microporosidad (%)	Macroporosidad (%)
AC	2509,6	2004,2	20,14	8,92	0,05	MUY SINUOSO	0,36	3,10	96,9	3,1
NHL5	2459,8	1615,1	34,34	9,71	0,09	MUY SINUOSO	1,33	2,86	95,7	4,3
HL5	1925,1	1789,0	7,07	0,08	2,07	MUY REGULAR	1,98	2,99	84,3	15,7
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO										
HELADICIDAD CON SALES										
AC_H	2287,4	2046,7	10,52	1,10	0,19	SINUOSO	0,23	306,77	96,9	3,1
NHL5_H	2126,3	1883,8	11,41	0,15	1,60	MUY REGULAR	1,57	80,84	86,1	13,9
HL5_H	2161,2	1853,0	14,26	0,51	0,60	REGULAR	1,02	92,59	94,7	5,3
CRISTALIZACIÓN DE SALES										
AC_S	2164,9	1958,5	9,07	0,47	0,39	REGULAR	0,48	10,93	77,1	22,9
NHL5_S	2131,8	1936,7	9,16	0,13	1,45	MUY REGULAR	1,33	73,76	90,2	9,8
HL5_S	1925,7	1762,4	8,48	0,08	2,48	MUY REGULAR	2,16	24,97	66,0	34,0

Tabla VI. Densidades, parámetros de poro y distribución porosimétrica para los tres tipos de morteros sometidos a deterioro inducido.

Las densidades aparentes (ρ_{ap}) son más bajas que las reales, reflejando la cantidad de porosidad que tienen estos morteros. Las porosidades son altas para los morteros de AC y NHL5 (20-34%), mientras que para el mortero de HL5 se queda en el 7,1%. En el primer caso, domina ampliamente la microporosidad (>95%), mientras que para el mortero HL5 baja al 84%. La forma de los poros en los morteros de AC y NHL5 es más sinuosa e irregular que los poros del mortero de HL5, pues presentan en ambos casos, unas superficies específicas

bastante elevadas (9-10 m²/g). En los tres morteros, las conexiones capilares entre los poros (tortuosidad) se acercan a 1 (~3), lo que indica que son conexiones rectas que facilitan el paso de los fluidos.

Después de los ensayos de deterioro, la tendencia general de los morteros de AC y NHL5 es a que sus ρ_{real} bajen y suban las ρ_{ap} , lo que refleja una caída generalizada de sus porosidades, por debajo del 12% (tabla VI). Este descenso es mayor después del ensayo por cristalización de sales, donde pueden reducir su porosidad hasta en un 75%. Por el contrario, el mortero de HL5 solo se ve modificado tras el ensayo de heladicidad, donde su porosidad se ve duplicada, con valores por encima del 14%. La relación micro/macroporosidad se ve bastante modificada después del ensayo de cristalización de sales, para los morteros con cemento (AC y HL5), los cuales ven aumentada su macroporosidad por encima del 23%. Después del ensayo de heladicidad, este comportamiento difiere entre los tres morteros, mientras que para el mortero de AC no hay cambios, para el mortero de HL5, la macroporosidad se reduce 2/3, mientras que aumenta en la misma proporción para el mortero de NHL5 (tabla VI). De igual forma, la morfología y conexiones capilares de los poros cambian tras los ensayos de deterioro. Los morteros de AC y NHL5, presentan reducción de la superficie específica y aumento del diámetro medio de poro, lo que refleja morfologías más regulares de poro y con menor sinuosidad que sus originales. En el mortero de HL5 solo cambian de forma sus poros después del ensayo de heladicidad, que los vuelve algo más sinuosos e irregulares que sus formas iniciales. La tortuosidad aumenta para todos los morteros después de ambos ensayos de deterioro, pero es el ensayo de heladicidad el que genera conexiones capilares más sinuosas e irregulares entre los poros, destacando el mortero de AC con una tortuosidad >300.

En la figura 33, aparecen las curvas de distribución de tamaños de poro para los tres morteros, antes y después de los dos ensayos de deterioro. En todos los casos, se aprecia que existe un dominio de la microporosidad (<5 μm) frente a la macroporosidad (>5 μm). Para los morteros de HL5 y NHL5 (Fig. 33b y 33c), la distribución de los tamaños de poro es claramente monomodal, siendo el intervalo de poro 1-3 μm el dominante. Por el contrario, el mortero de AC (Fig. 33a) muestra una distribución claramente polimodal de sus tamaños de poro, estando el 90% de la porosidad entre dos intervalos de poro (0,1-3 μm de diámetro de poro).

Después de los ensayos de deterioro, se observan cambios en estos intervalos de tamaño de poro, mientras que para el mortero de HL5 se reducen los poros de tamaño 1-3 μm , para los restantes morteros aumentan los tamaños en sus respectivos intervalos dominantes de poro. Es destacable, el aumento de la macroporosidad después del ensayo de deterioro por cristalización de sales en los morteros con cemento (AC y HL5), así como el aumento de la microporosidad en el intervalo 0,1-1 μm después de la heladicidad con sales para estos mismos morteros (Fig. 33a y 33c).

Además, se observa como la microporosidad disminuye levemente tras el deterioro inducido, y la macroporosidad aumenta considerable tras la cristalización de sales (Tabla VI).

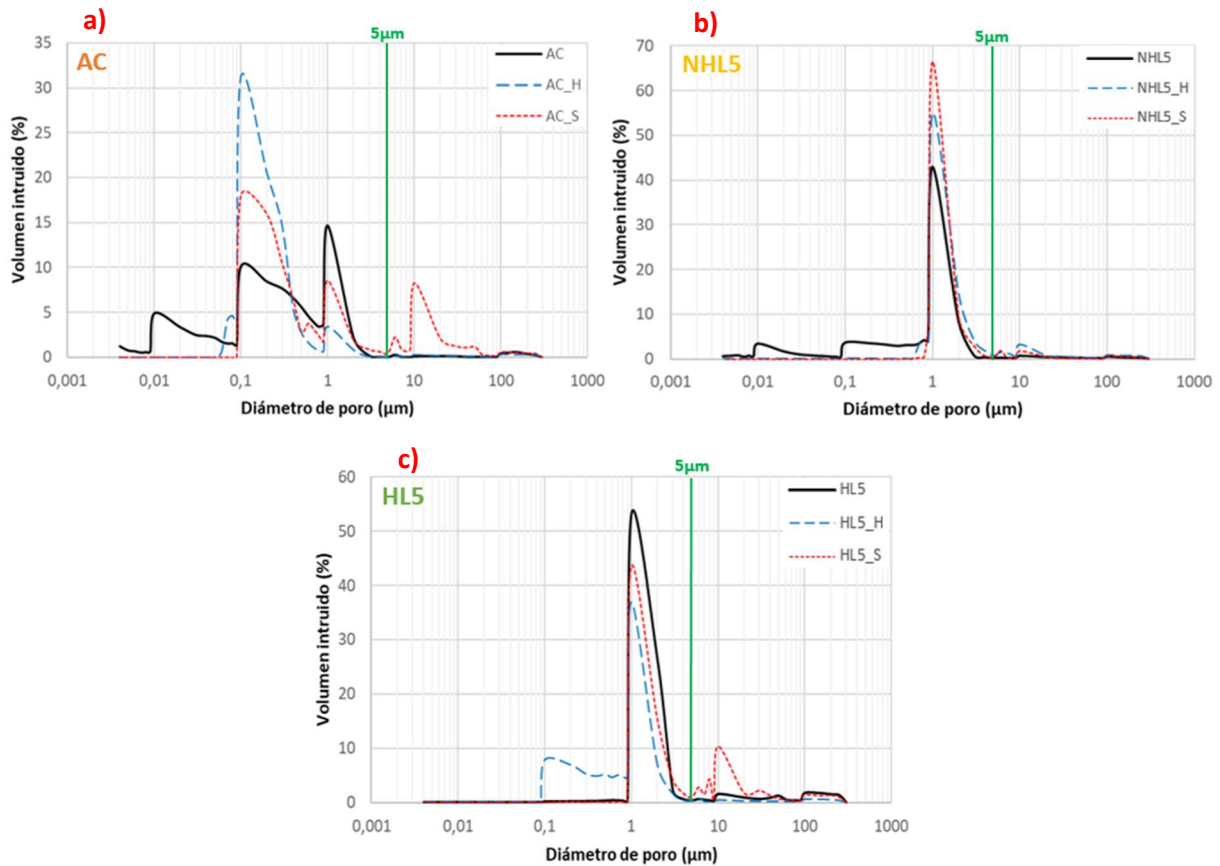


Fig.33. Curvas de distribución de tamaños de poro para los tres tipos de morteros estudiados; a) AC, b) NHL5 y c) HL5. La línea verde vertical marca el límite entre la microporosidad (<5µm) y la macroporosidad (>5µm).

5.2.3.2 Ensayo hídrico de saturación (SAT)

Tras el ensayo de saturación, los parámetros obtenidos se han recogido en la tabla VII, en la que puede apreciar que las densidades reales (ρ_{real}) obtenidas son elevadas para los tres tipos de morteros, encontrándose en torno a los 2600 kg/m³. Sus diferencias con las densidades aparentes son grandes, estando estas por debajo de 2000 kg/m³, lo que refleja porosidades totales altas (23-34%). Esta porosidad está estrechamente relacionada con su grado de compactidad, siendo más bajo en el caso del mortero de HL5 porque es el mortero más poroso de todos. Al ser este mortero el más poroso tiene mayor capacidad de absorción de agua por lo que satura por encima del 19%. Por el contrario, el mortero de AC es el mortero menos poroso, más compacto y con una capacidad de saturación en agua del 11%. Los tres morteros presentan una alta porosidad abierta frente una escasa porosidad atrapada, aunque destaca el mortero de AC con el 0,16%.

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO							
Muestra	Densidad real ρ_{real} (kg/m ³)	Densidad aparente ρ_{ap} (kg/m ³)	Porosidad total (%)	Porosidad abierta (%)	Porosidad atrapada (%)	Compacidad (0-1)	Saturación (%)
AC	2595,0 ± 12,0	2007,3 ± 58,4	22,6 ± 2,4	22,5 ± 2,4	0,16 ± 0,0	0,77 ± 0,0	11,2 ± 1,6
NHL5	2635,1 ± 1,1	1851,8 ± 13,3	29,7 ± 0,5	29,6 ± 0,5	0,14 ± 0,0	0,70 ± 0,0	15,9 ± 0,4
HL5	2611,1 ± 5,6	1731,9 ± 72,3	33,7 ± 2,8	33,5 ± 2,8	0,13 ± 0,0	0,66 ± 0,0	19,4 ± 2,4
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO							
HELADICIDAD CON SALES							
AC_H	2460,3 ± 24,3	2138,8 ± 22,3	13,1 ± 1,2	12,9 ± 1,2	0,17 ± 0,0	0,87 ± 0,0	6,0 ± 0,6
NHL5_H	2462,9 ± 15,9	1993,3 ± 7,3	19,1 ± 0,6	18,9 ± 0,6	0,16 ± 0,0	0,81 ± 0,0	9,5 ± 0,3
HL5_H	2485,5 ± 20,2	1835,7 ± 55,0	26,2 ± 1,6	26,0 ± 1,6	0,15 ± 0,0	0,74 ± 0,0	14,2 ± 1,3
CRISTALIZACIÓN DE SALES							
AC_S	2556,9 ± 11,0	2040,0 ± 99,3	20,2 ± 3,6	20,1 ± 3,6	0,16 ± 0,0	0,80 ± 0,0	9,9 ± 2,3
NHL5_S	2584,1 ± 4,0	1941,8 ± 1,9	24,9 ± 0,1	24,7 ± 0,1	0,15 ± 0,0	0,75 ± 0,0	12,7 ± 0,1
HL5_S	2485,5 ± 21,8	1833,1 ± 96,8	28,2 ± 3,2	28,0 ± 3,2	0,14 ± 0,0	0,72 ± 0,0	15,4 ± 2,7

Tabla VII. Valores medios y desviaciones estándar de los parámetros obtenidos en el ensayo hídrico de saturación, para los tres tipos de morteros sometidos a deterioro inducido.

Tras el deterioro inducido, las densidades reales tienden a disminuir levemente, notándose que esta disminución es mayor tras el ensayo de heladicidad con sales (~2500kg/m³, tabla VII). Por el contrario, las densidades aparentes aumentaron prácticamente por igual después de ambos ensayos (ρ_{ap} = 1800-2100kg/m³), lo que refleja un descenso en las porosidades totales respecto a sus porosidades originales por la presencia de las sales en su interior, y que son más evidentes tras el ensayo de heladicidad (hasta un 44%), siendo el mortero de AC el menos poroso de todos con un 13%, y por consiguiente, el más compacto (0,87/1) y con menor capacidad de saturación en agua (6%) de todos. También, tras este ensayo se produce un aumento ligeramente mayor en la porosidad atrapada (0,15-0,17%). El mortero de HL5 es el mortero que menos se ve afectado por estos ensayos de deterioro, por lo que su porosidad total desciende solo un 18-24%, presentando en consecuencia, menor compacidad (0,7/1) y mayor capacidad de saturación (14-15%), con respecto a los otros dos morteros.

5.3 Caracterización mecánica

5.3.1 Resistencia al rebote. Dureza superficial de Schmidt

Tras el ensayo con el martillo Schmidt, se observa que, el mortero de AC presenta mayor dureza superficial (>36R), lo que indica que son materiales de dureza alta, frente al resto de morteros, que con valores de 10-13R, reflejan una baja dureza superficial (Tabla VIII).

Tabla VIII. Microdureza de Leed (HLD) y dureza de Schmidt (R), junto a las RSC (MPa) obtenidas mediante las fórmulas pertinentes.

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO				
Muestra	Microdureza de Leeb (HLD)	RSC (MPa) Aoki and Matsukura (2008)	Dureza de Schmidt (R)	RSC (MPa) Deere and Miller (1966)
AC	296,7 ± 44,7	11,4 ± 3,7	36,5 ± 4,3	43,3 ± 7,2
NHL5	212,3 ± 37,8	8,1 ± 1,3	10,0 ± 0,0	14,5 ± 0,0
HL5	220,1 ± 22,3	6,4 ± 0,6	13,5 ± 5,2	15,9 ± 2,7
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO				
HELADICIDAD CON SALES				
AC_H	428,0 ± 23,5	32,3 ± 1,9	39,8 ± 1,8	55,1 ± 4,2
NHL5_H	314,4 ± 22,4	18,1 ± 1,4	13 ± 1,3	16,8 ± 0,9
HL5_H	227,4 ± 18,2	9,1 ± 0,8	17,5 ± 1,5	19 ± 1,3
CRISTALIZACIÓN DE SALES				
AC_S	510,0 ± 40,6	34,2 ± 3,0	39,5 ± 7,2	50,1 ± 13,2
NHL5_S	337,8 ± 32,1	16,0 ± 1,7	23,5 ± 8,9	24,8 ± 9,3
HL5_S	344,6 ± 37,5	15,5 ± 1,9	29,0 ± 1,9	28,9 ± 1,9

Después del deterioro inducido, los valores de dureza superficial (R) han aumentado (tabla VIII, Fig. 34).

El aumento de la dureza superficial tras los ensayos de deterioro en todos los morteros, está en consonancia con el aumento de sus velocidades de propagación ultrasónica (V_p), debido a la presencia de sales relleno su porosidad y principalmente cerca de la superficie (Fig. 34). Este aumento es más notorio después del ensayo de cristalización de sales, y más concretamente para los morteros de cales hidráulicas (HL5 y NHL5, 23-29R), que pasan a tener una dureza superficial media (Fig. 34b). Después del ensayo de heladicidad, estos morteros, aunque aumentan ligeramente su dureza superficial, esta sigue estando por debajo de 20R, lo que denota que siguen teniendo una baja dureza superficial. Por el contrario, el mortero de AC es el menos afectado por estos ensayos de deterioro, y siguen presentando una alta dureza superficial (Fig. 34a).

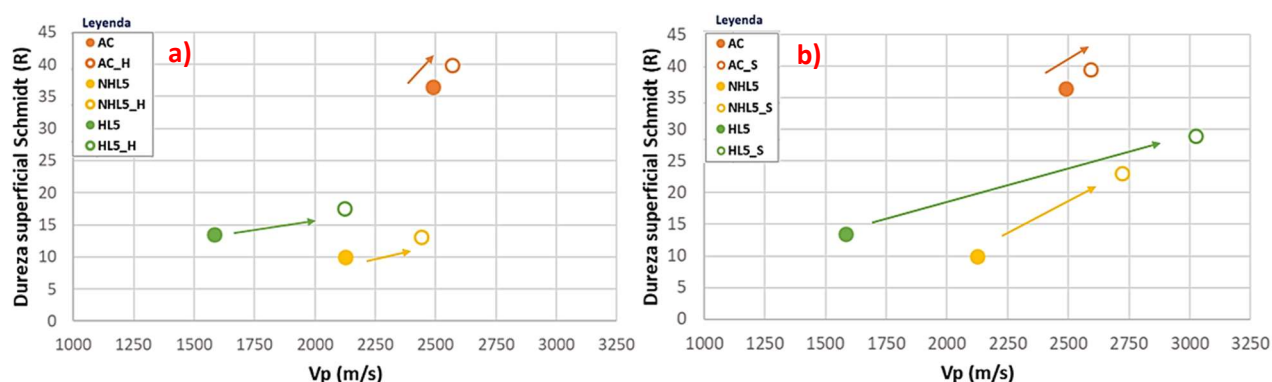


Figura 34. Relación entre V_p (m/s) y dureza superficial Schmidt (R) tras la heladicidad con sales (a) y la cristalización de sales (b).

5.3.2 Resistencia al microrrebote. Microdureza superficial de Leeb (HLD)

En el ensayo con el microdurómetro Equotip, se observa (tabla VIII) que los valores de microdureza superficial no son altos (200-300/1000 HLD) pues se impacta sobre el conglomerante, y no sobre la mezcla de conglomerante + árido como lo hace el martillo de Schmidt. Igual que como con la dureza de Schmidt, la microdureza de Leeb es más elevada en el mortero de AC (300 HLD), mientras que es similar y más baja para los morteros de cales hidráulicas (HL5 y NHL5, 210-220 HLD).

Después de los ensayos de deterioro, y principalmente después de la cristalización de sales, la microdureza de Leeb aumenta en todos los morteros, aunque es mayor para el mortero de AC, lo que le da una microdureza superficial media (500/1000 HLD), como consecuencia de la presencia de las sales cristalizadas dentro del conglomerante.

Además, comparando la evolución conjunta de la dureza Schmidt (R) y la microdureza Leeb (HLD, Fig.34) se observa que para ambos casos y tras ambos ensayos de deterioro inducido, los valores de R y HLD han aumentado, sobre todo tras la cristalización de sales. En el caso

del mortero de AC, el aumento en la dureza Schmidt (R) no es destacable tras los ensayos, sin embargo, sí lo es para la microdureza Leeb. En el caso de los morteros de cales hidráulicas (HL5 y NHL5), el aumento de R no destaca tras la heladicidad, pero sí es considerable tras la cristalización de sales. Por último, indicar la buena correlación lineal ($R^2 = 0.96$) entre ambos parámetros para el mortero de HL5, en la que los valores de R y HLD tras la heladicidad aumentan levemente, y casi duplican su valor tras la cristalización de sales.

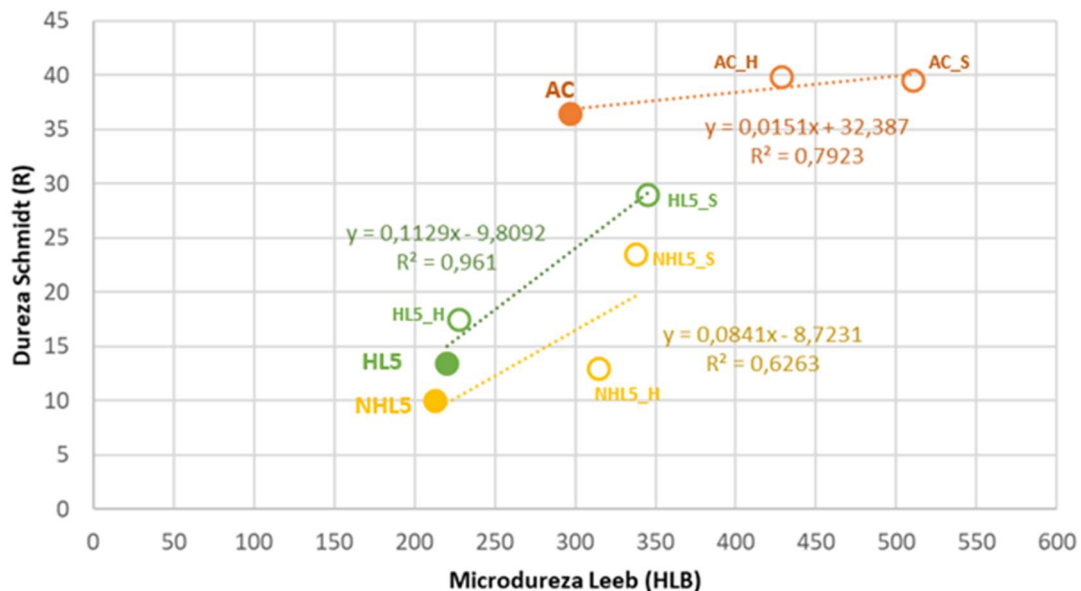


Figura 35. Relación entre microdureza Leeb (HLD) y dureza Schmidt (R) después de los ensayos de deterioro para los tres morteros hidráulicos estudiados.

5.3.3 Resistencia a la compresión simple uniaxial indirecta

Aplicando la formulación de Deere and Miller (1966) para la obtención de la resistencia a la compresión simple de un material a partir de los datos obtenidos con el martillo de Schmidt, y siguiendo la Tabla de Clasificación ISMR (1981), se han obtenido los valores de RCS en MPa de manera indirecta (Tabla VIII). Tanto en la tabla VIII y cómo en la figura 36, se observan dos comportamientos bien definidos.

Por un lado, está el grupo de morteros de cales hidráulicas (NHL5 y HL5), con valores de RCS y R notablemente inferiores al otro grupo formado por el mortero de cemento (AC) (Fig. 36). Los valores de RCS para el mortero de AC es 43MPa lo que indica que pertenece a la Clase R_3 de piedra moderadamente dura, mientras que los valores de RCS para los morteros de cal solo es de 14-16MPa, lo que las clasifica como una Clase R_2 de piedra blanda. Estos valores de resistencia suben después de los ensayos de deterioro. Para el mortero de AC, la resistencia aumenta algo más tras el ensayo de heladicidad (55MPa), volviéndola una piedra dura (Clase R_4 , Fig. 36a), mientras que es después del ensayo de cristalización de sales (Fig. 36b), cuando los morteros de cal casi duplican su resistencia (25-29MPa), estando entre las Clases R_2 y R_3 de piedras blandas a moderadamente duras.

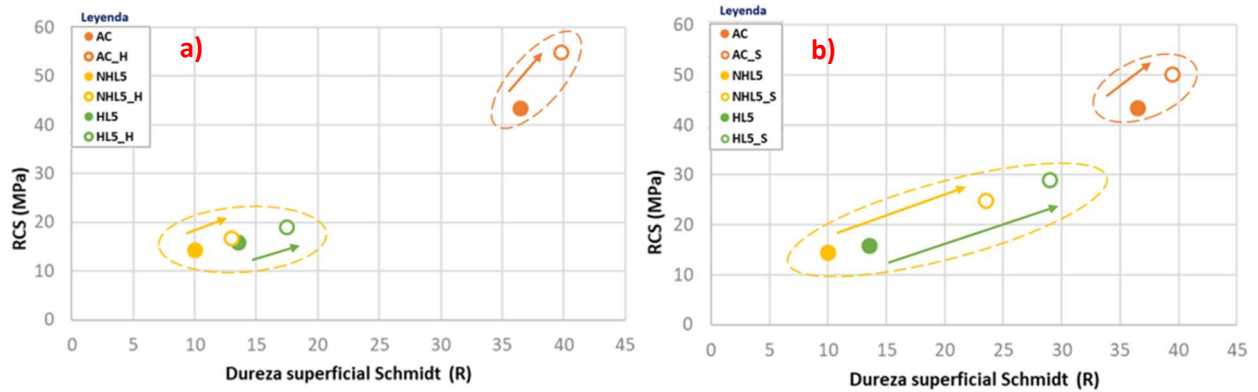


Figura 36. Relación entre dureza superficial Schmidt (R) y la resistencia a la compresión simple uniaxial indirecta (RCS; MPa) después de los ensayos de heladicidad con sales (a) y cristalización de sales (b).

Por otro lado, en cuanto a la RCS (MPa), ésta es calculada a partir de la formulación de Aoki y Matsukura (2008) con los datos de microdureza superficial de Leeb, y se observa que los valores de RCS no coinciden con los datos obtenidos a partir de la formulación de Deere and Miller para el martillo de Schmidt (Tabla VIII, apartado 5.3.1), ya que en el caso anterior (martillo Schmidt), los valores de dureza se obtienen de toda la mezcla (árido + conglomerante), mientras que con el microdurómetro Equotip solo se obtiene la dureza del conglomerante, y éste valor va a ser menor que la de todo el conjunto (árido + conglomerante). Aun así, se observa que el cemento artificial (AC) sigue teniendo valores más altos (11MPa) que las cales (NHL5 y HL5, 6-8MPa). La clasificación ISRM, incluiría a los tres conglomerantes en la Clase R_2 de materiales blandos.

Después de los ensayos de deterioro (tabla VIII, Fig. 37), estos valores de RCS suben, y lo hacen más tras la cristalización de sales, cuando se duplican los valores para las cales (15-16MPa) y se triplican los del cemento (34MPa, Fig. 37b). En cualquier caso, el cemento (AC), después de los dos ensayos de durabilidad, supera los 30 MPa de resistencia por lo que pasa de ser un material blando a uno moderadamente duro (Clase R_3). Las cales se endurecen tras ambos ensayos, pero no cambian de clase (Clase R_2 -materiales blandos).

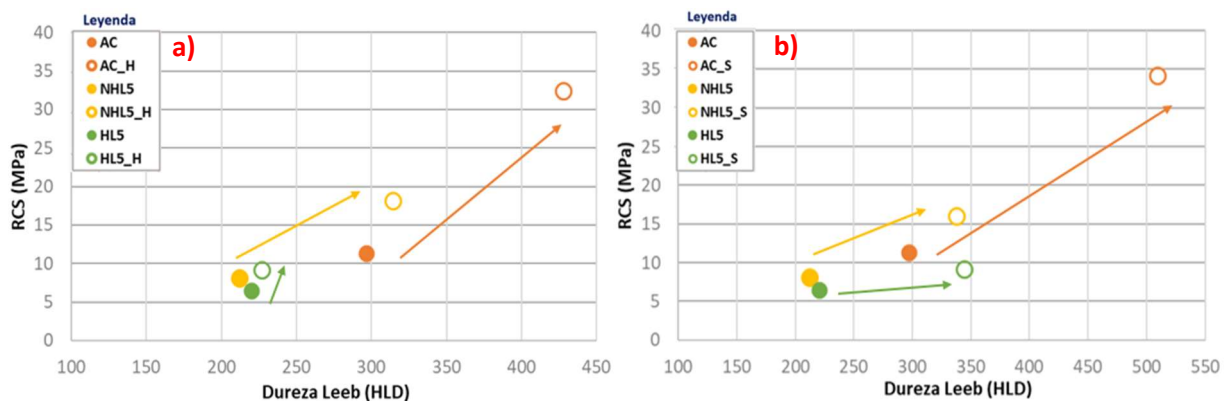


Figura 37. Relación entre microdureza de Leeb (HLD) y RCS (MPa) después de la heladicidad con sales (a) y la cristalización de sales (b).

5.3.4 Resistencia a la perforación (DRMS)

Para evaluar la resistencia (N) que oponen los morteros a la perforación con el taladro (*microdrilling*), y comparar dicha resistencia tras los ensayos de deterioro inducido, se elaboró un histograma comparativo (Fig. 38), en el que se puede apreciar como el mortero de cemento ofrece una alta resistencia inicial a la perforación, y como los morteros de cal hidráulica tras los ensayos de deterioro aumentan considerablemente su resistencia a la perforación (N), sobre todo tras la cristalización de sales. El mortero de AC no se ve afectado por la heladicidad, pero si aumenta su resistencia con la cristalización de sales, aunque en menor proporción a cómo lo hacen los morteros de cal.

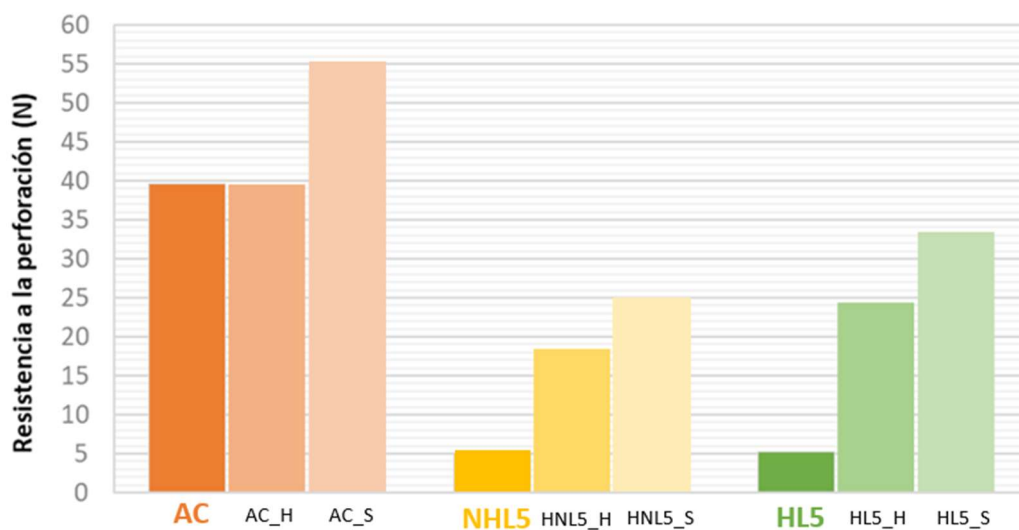


Figura 38. Resistencia a la perforación (N) para los tres tipos de morteros sometidos a los deterioros inducidos (heladicidad con sales; _H) y (cristalización de sales; _S).

Observando la Tabla IX, para el caso del mortero de AC, con una resistencia inicial a la perforación de 40N, tras la heladicidad apenas sufre cambio, pero el aumento de la resistencia sí es destacable tras la cristalización de sales, pasando a ~56N. Por otro lado, para el caso de los morteros de cal, con una resistencia inicial a la perforación similar en ambos casos y muy baja (5,5N), sí sufren un aumento considerable de dicha resistencia tras la heladicidad con sales (18N - NHL5 y 24N - HL5), y un incremento en la resistencia aún mayor tras la cristalización de sales (25N - NHL5 y 34N - HL5).

ANTES DEL DETERIORO INDUCIDO	
Muestra	Resistencia a la perforación (N) <i>Drilling resistance</i>
AC	39,5 ± 1,3
NHL5	5,4 ± 0,3
HL5	5,3 ± 1,3
DESPUÉS DEL DETERIORO INDUCIDO	
HELADICIDAD CON SALES	
AC_H	39,6 ± 3,1
NHL5_H	18,4 ± 1,0
HL5_H	24,4 ± 3,8
CRISTALIZACIÓN DE SALES	
AC_S	55,6 ± 4,1
NHL5_S	24,9 ± 2,1
HL5_S	33,5 ± 0,3

Tabla IX. Valores de la resistencia a la perforación (*Drilling Resistance*; N) tras los ciclos de deterioro inducido.

6 DISCUSIÓN

Tras realizar los ensayos de durabilidad (heladicidad con sales y cristalización de sales) y exponer los resultados de las distintas técnicas y ensayos, se hará un análisis global que permita relacionar todos los datos obtenidos, y así estimar y comparar la calidad y durabilidad que muestran los tres tipos de morteros estudiados.

El mortero de cemento artificial Portland (AC), tras ser sometido a la heladicidad con sales, petrográficamente no ha mostrado deterioro destacable, salvo algunas fisuras interconectadas en superficie. Sin embargo, las fisuras son más destacables y generalizadas tras el ensayo de cristalización de sales, a consecuencia del esfuerzo de expansión que han generado las sales al cristalizar en el interior de su sistema poroso (Fig. 27). Petrográfica y mineralógicamente se detecta la presencia de la alita, que es el silicato tricálcico característico de este tipo de conglomerantes. También se detecta la presencia en su interior y en superficie de las sales utilizadas en ambos ensayos de deterioro. A efectos químicos, tras los deterioros inducidos, el proceso de fraguado se ha completado, habiendo desaparecido las fases hidratadas (portlandita).

Inicialmente, el mortero de AC es de color gris claro (L*-70 y C*-6) y tras los ensayos de deterioro inducido, no han sufrido cambios cromáticos significativos ($\Delta E^* < 5$) perceptibles al ojo humano (Grossi et al, 2007 y Cultrone y Sánchez-Ibáñez, 2018).

La Vp (m/s) inicial para el mortero de AC es de 2383 m/s (valor medio) y depende de la densidad del material, de su porosidad, mineralogía, textura, y grado de anisotropía, así como de su contenido en agua y otros fluidos (Fort et al., 2008, 2011). Como consecuencia de la presencia de los cloruros rellenando el interior de sus poros tras el ensayo de heladicidad, sus valores de Vp suben (Vp= 2590 m/s), aunque tras la cristalización de sales su Vp disminuye (Vp= 2032 m/s) debido a que es mayor su grado de fisuración que la presencia de sulfatos rellenando sus poros (Fig. 32). Estas variaciones en la Vp se relacionan con la anisotropía, que para el caso del mortero de AC es alta (dM-24%) y está asociada a la existencia de una dirección textural preferente que puede ser aprovechada para su deterioro (dM>dm), posiblemente asociada a la elaboración de este mortero. Esta dirección preferente prácticamente desaparece después del ensayo de cristalización de sales por su relleno con dichas sales (dM~dm).

La presencia de sales en el interior de este mortero es debido a su elevada porosidad inicial (22,6%), predominantemente de tipo abierta por la que circula libremente el agua con las sales disueltas (capacidad de saturación del 11%). Pero esta porosidad se ve reducida de forma muy notable (Fig. 33) tras la heladicidad (13%), debido a que precipitan los cloruros en su

microporosidad dominante (97%), modificando la forma de sus poros que ven reducida su sinuosidad y tamaño medio, la cual se concentra en el intervalo 0,1-0,3 μm y volviendo así su microporosidad monomodal. Después de la cristalización de los sulfatos, su porosidad inicial apenas varía (20%), pero si se ve modifica, ya que por una parte se cierra aquella microporosidad más pequeña por el precipitado de sales y por otra, se genera una nueva por la aparición de un gran número de fisuras, haciendo aumentar su macroporosidad (23%) y volviendo más regular la morfología de estos nuevos poros.

El mortero de cemento clásico Portland (AC), tiene inicialmente una dureza superficial media (37 R y 43,3 MPa), que se ve aumentada después de los ensayos de deterioro, convirtiéndolos en materiales duros (~ 40 R y >50 MPa). El aumento de su dureza superficial tras los dos ensayos se debe a la presencia de las sales precipitadas sobre y bajo su superficie. La microdureza superficial inicial asociada al conglomerante también es elevada (300 HLD y 11 MPa), aumentando bastante después de los ensayos, principalmente después del ensayo de cristalización de las sales en su microporosidad superficial (>500 HLD y 34 MPa). La presencia las sales aumenta la dureza de este mortero a pesar de las fisuras y grietas generadas, principalmente después del ensayo de cristalización de sales. Además, en este último caso, el aumento de la dureza superficial se traduce en un aumento en su resistencia a ser perforado (40 a 56N) (Fig. 35).

En el caso del mortero de cal hidráulica natural (NHL5), petrográficamente no ha sido muy afectada tras los ciclos de deterioro inducido (Fig. 27), ya que únicamente se han observado pequeñas grietas y sales cristalizadas (costras), afectando a la superficie de las probetas (primeros 2mm). Desde el punto de vista mineralógico y químico, y al igual que en el caso del AC, se ha observado que el proceso de fraguado se ha completado tras el deterioro, ya que han desaparecido los hidróxidos. Además, aparece una alta concentración de sales, principalmente después del ensayo de heladicidad (yeso y halita). En cuanto al color, el mortero de NHL5 es un mortero blanco, claro y luminoso, ($L^* 85$, $C^* 6$), pero con una tendencia general tras el deterioro a perder blancura, oscureciéndose y amarilleando. El cambio global de color es perceptible al ojo principalmente tras la heladicidad ($\Delta E^* >8$).

El mortero de NHL5 muestra inicialmente una V_p media de 2200 m/s, y tras los ensayos de deterioro, estas velocidades aumentan hasta los 2400-2700 m/s como consecuencia del relleno de su elevada porosidad (30%) con las sales de ambos ensayos (Fig. 32). Este mortero es poco anisótropo ($dM 5,5\%$) y bastante homogéneo ($dM \sim dm$), y esa baja anisotropía no se ve apenas modificada después de los ensayos de deterioro. Es un mortero de alta densidad real ($>2600\text{kg/m}^3$) y elevada porosidad abierta (29,6%), por lo que tiene una alta capacidad de saturarse en agua (16%). Pero después de los ensayos de deterioro su porosidad y grado de saturación se ven reducidos, principalmente tras el ensayo de heladicidad (19% de

porosidad y 9,5% de saturación en agua), modificando sustancialmente la forma original de sus microporos (1-2 μm , 96%) que pasan de ser muy sinuosos e irregulares a poros más regulares y con una reducida superficie específica, debido a la precipitación de ambos tipos de sales tapizando estos poros. El aumento de la macroporosidad (14%), se debe a la formación de fisuras después del ensayo de heladicidad (Fig.33).

Para los ensayos mecánicos, en el caso del NHL5, presenta una dureza superficial inicial baja al ser un material blando (10R y 14,5 MPa), por lo que apenas opone resistencia a ser perforado (5,4N). Tras el ensayo de cristalización de sales, las sales precipitadas sobre y cerca de su superficie, lo que hacen aumentar su dureza superficial (>21R y 25MPa) convirtiéndolo en un mortero moderadamente duro y aumentando su resistencia a ser perforado (25N). La microdureza superficial inicial del conglomerante (212HLD y 8MPa) se ve afectada de igual forma, aumentando tras los dos ensayos, sin apenas diferencias entre ellos (314-338HLD y 16-18MPa) (Fig. 35).

Por último, para el caso del mortero de cal hidráulica aditivada (HL5), se ha observado petrográficamente un elevado grado de deterioro tras la cristalización de sales, con procesos de disgregación intergranular y fisuración, que son a nivel más superficial tras la heladicidad con sales (Fig. 27). Igual que en los casos anteriores, el proceso de fraguado se ha completado tras su deterioro, y en cuanto a su aspecto, las probetas que son inicialmente de color gris muy claro y luminoso (L^*81 y C^*5) tienden a perder luminosidad, blancura y a amarillear ligeramente. Los cambios de color son escasamente perceptibles al ojo, siendo más visibles después del ensayo de cristalización de sales ($\Delta E^* \sim 7$).

El mortero de HL5 muestra inicialmente el valor más bajo de V_p (2157m/s) de los tres morteros ensayados, y aumentan tras los ensayos de deterioro (2300-2500 m/s) debido a la acumulación de sales precipitadas en su interior (Fig. 32). La V_p tiene una enorme dispersión de valores, ya que algunas muestras fueron gravemente dañadas tras la cristalización de sales. También hay un aumento importante de ambas anisotropías y que se asimilan entre sí ($dM \sim dm$, 15~12%) tras la cristalización de sales, lo que indica un alto grado de deterioro repartido de forma homogénea en sus tres direcciones espaciales. La presencia de sales en su interior es consecuencia de su elevada porosidad abierta inicial (>33%), la cual facilita la circulación del agua (>19% de saturación) cargada con sales disueltas. Tras ambos ensayos de deterioro, esta porosidad se reduce ligeramente por precipitación de esas sales, siendo algo mayor esta caída después del ensayo de heladicidad (>26%), y que conlleva una reducción en su grado de saturación en agua (14-15%). En este mortero, la macroporosidad inicial es la más alta (16%) de los tres morteros, y solo se duplica después del ensayo de cristalización de sales (34%) por la presencia de fisuras y disgregación intergranular que contrarrestan la precipitación de esas sales (Fig. 33). Por el contrario, después de la

heladicidad, la microporosidad aumenta (95%) frente a la macroporosidad que se reduce respecto a la inicial, porque las sales tapizan esa porosidad reduciendo su tamaño.

Para los ensayos mecánicos, este mortero se comporta igual que el mortero de NHL5. Presenta una baja dureza superficial inicial (13,5R y 16MPa), lo que los hace materiales blandos. A consecuencia de la acumulación de sales en superficie, de nuevo se aprecia un aumento en los valores de dureza y resistencia, principalmente después del ensayo de cristalización de sales (29R y 29MPa), que los vuelve moderadamente más duros (dureza media), ofreciendo mayor resistencia a su perforación, la cual pasa de los 5N iniciales a los 33,5N tras el ensayo de cristalización de sales. De igual forma, la microdureza superficial inicial del conglomerante (220HLD y 6MPa) se va a ver aumentada después del ensayo de cristalización de sales, debido a la presencia de estas sales en su superficie (345HLD y 15,5MPa) (Fig. 35).

7 CONCLUSIONES

Los morteros estudiados se agrupan en dos tipos diferentes, no solo por el conglomerante utilizado (cemento artificial y cal hidráulicas), sino también por sus características físico-mecánicas, las cuales han demostrado depender más de las características del propio conglomerante, que del tipo de árido empleado en su elaboración. Especialmente en el caso, de los morteros de cal hidráulica donde se han empleado dos áridos distintos (arenas cuarzosas normalizadas y arenas de río cuarzo-feldespáticas).

El mortero de cemento artificial (AC) es un mortero gris de alta densidad, anisotropía ($dM > 24\%$) y velocidad de propagación ultrasónica (2400m/s), debido a que es el mortero de menor porosidad (22%) y capacidad de saturación en agua (11%). Este mortero presenta una elevada microporosidad polimodal ($>95\%$). Estas propiedades físicas condicionan su mayor dureza (37R y $>43\text{MPa}$) y resistencia (40N) superficiales. Por el contrario, los morteros de cal hidráulica (HL5 y NHL5) son morteros blanquecinos, de baja anisotropía ($dM \sim 5,5\%$) y menor velocidad ultrasónica (2200m/s), pero de alta porosidad ($>30\%$) y capacidad de saturación en agua (16-19%). En este caso, su microporosidad sigue siendo dominante (84-96%), aunque tiene un claro carácter monomodal (1-2 μm). Estas propiedades físicas, hacen que sean materiales blandos (10-14R y 15-16MPa) y de baja resistencia ($\sim 5\text{N}$) superficial.

Según estas características físico-mecánicas, el mortero de cemento artificial (AC) presenta mejor calidad para ser usado en una obra que los morteros de cal hidráulica. Pero al considerar las condiciones medioambientales más frecuentes (agua, sales y temperaturas), circundantes al lugar de su colocación, y valorar sus efectos sobre estos morteros, su grado de durabilidad modifica las agrupaciones realizadas inicialmente en función de su calidad al provocar cambios significativos en sus características físico-mecánicas. Estos cambios afectan principalmente al conglomerante.

El grupo de morteros que tienen cemento artificial (AC y HL5) se degradan más rápidamente que el mortero de cal hidráulica natural (NHL5). Los primeros ven reducida de forma significativa su durabilidad en apenas 30 días, tras la agresión que provoca la cristalización de los sulfatos en su interior.

En los tres morteros, la precipitación de las distintas sales (cloruros y sulfatos) provoca la reducción de su porosidad y capacidad de saturación en agua, y el aumento de su velocidad de propagación ultrasónica, dureza y resistencia. Pero en el caso, de los morteros de AC y HL5, y después de la cristalización de los sulfatos en el interior de sus poros, su microporosidad de menor tamaño ($<0,1 \mu\text{m}$) no soporta la presión de cristalización de estas sales y estalla, aumentando su tamaño de poro y generando mayor macroporosidad ($>5 \mu\text{m} = 23-34\%$) y anisotropía, que se traduce en un enjambre de fisuras y grietas visibles en todas

las probetas. Por el contrario, el mortero de NHL5 es el más duradero de todos, pues soporta bien la precipitación y cristalización de los sulfatos y los cloruros en sus poros de $< 1\mu\text{m}$ de diámetro, viendo mejoradas sus características físico-mecánicas. Aunque después del ensayo de heladicidad con los cloruros, este mortero amarillea y su conglomerante sufre algunos procesos de disolución que implican un ligero aumento de su macroporosidad $>13\%$, pero sin mayores consecuencias en su estado de conservación.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Adams, J., Dollimore, D., Griffiths, D.L. (1993). Thermal analysis investigation of ancient mortars from Gothic structures. *Journal of Thermal Analysis*, 40, 275-284.
- Álvarez-Galindo, J.I., Martín, A., García Casado, P.J. (1995). Historia de los morteros. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio histórico*, 3(13), 52-59.
- Aoki, H, Matsukura, Y. (2008). Estimating the unconfined compressive strength of intact rocks from Equotip hardness. *Life and Environmental Sciences*, University of Tsukuba.
- Arizzi, A., Cultrone, G. (2021). Mostars and plasters – How to characterise hydraulic mostars. *Archaeological and Anthropological Sciences*. Department of Mineralogy and Petrology, Faculty of Sciences, University of Granada.
- ASTM A-956. *Standard test method for Leeb hardness testing of Steel products*. American Society for Testing and Material (ASTM), West Conshohocken, PA, 1996.
- ASTM D 4404-10. *Standard test method for determination of pore volumen and pore volumen distribution of soil and rock by Mercury Intrusion Porosimetry*. American Society for Testing and Material (ASTM), Pennsylvania, 2010.
- Benavente, D., García del Cura, M. A., Fort, R., Ordóñez, S. (2004): Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* 74, 113, 127.
- Bustillo, M. (2008). Hormigones y Morteros. Fueyo Editores. 721 pp.
- Calleja, J. (1963). El yeso como constituyente de los conglomerantes hidráulicos. *Materiales de construcción*, 13(110), 49-60.
- Cultrone, G., Sánchez-Ibañez, V (2018). Consolidation with ethyl silicate: how the amount of product alters the physical properties of the bricks and affects their durability. *Materiales de Construcción*. 68 [332], e173. Facultad de Ciencias, Universidad de Granada
- Deere, D., Miller, R. (1966). Clasificación de ingeniería y propiedades de índice para roca intacta. *Tech. Informe Técnico nº. AFWL – TR-65-116*. Laboratorio de Armas de la Fuerza Aérea, Nuevo México.
- Costa, D., Magalhães, A., Do Rosário Veiga, M (2010). *Characterisation of Mortars Using Drilling Resistance Measurement System (DRMS): Tests on Field Panels Samples*. National Laboratory for Civil Engineering (LNEC), Lisbon, Portugal
- Esbert, R. M., Ordaz, J., Alonso, F, J., Montoto, M. (1997). *Manual de diagnosis y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, 139 pp.
- Fort, R., Varas-Muriel, M.J., Ergenç, D., Cassar, J., Anastasi, M., Vella, N.C. (2023). The technology of ancient lime mortars from the Żejtun Roman Villa (Malta). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 15:15
- Fort, R y Elena M. Pérez (2011): Conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*.
- Fort, R., Fernández-Revuelta, B., Varas, M. J., Álvarez de Buergo, M., Taborda-Duarte, M. (2008): Influencia de la anisotropía en la durabilidad de las dolomías Cretácicas de la Comunidad de Madrid frente a la cristalización de sales. *Materiales de Construcción*, 58: 289-290.
- Furlan, V., Bissegger, P. (1975). Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique. *Revue Suisse d'Art et d'Archéologie*, 32, 1-14.
- Giavarini, C., Ferretti, A.S., Santarelli, M.L. (2006). Mechanical characteristics of Roman "opus caementicium". In S. K. Kourkoulis (Ed.), *Fracture and Failure of Natural Building Stones*, Berlin: Springer, 107-120.

- Gómez Marfil, A., Varas Muriel, M.J. (2023). Demanda Gold sandstone (Burgos): effect of consolidation and ageing tests on its petrographic and petrophysical properties. *Materiales de Construcción* 73 (349), Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.
- Grossi, C.M., Brimblecombe, P., Esbert, R.M, Alonso, F.J (2007) Color changes in architectural limestones from pollution and cleaning. *Color Res Appl* 32(4):320–321.
- Li, X., Rupert, G., Summers, D. A., Santi, P., (2000). Analysis of impact hammer rebound to estimate rock drillability. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 33 (1): 1-13.
- López-Arce, P. (2011): *Ladrillos de edificios históricos de Toledo: caracterización, origen de las materias primas y aplicaciones para su conservación y restauración*. Tesis Doctoral (2004), Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid.
- Malinowski, R. (1979). Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International*, 1(1), 66-76.
- Malinowski, R. (1981). Ancient mortars and concretes. Durability aspects. *In Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Symposium, ICCROM, Rome, 341-350.
- Malinowski, R., Garfinkel, Y. (1991). Prehistory of Concrete: Concrete Slabs Uncovered at Neolithic Archaeological Site in Southern Galilee. *Concrete International*, 62-68.
- Malinowski, R., Slatkine, A., Ben Yair, M. (1961). Durability of roman mortars and concretes for hydraulic structures at cesarea and tiberias. *RILEM International Symposium*, Prague, 531-544.
- Martínez, S., Blanco, M.T. (2012). Caracterización de morteros históricos. Programa Geomateriales (Ed), *La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio*, 55-62.
- Morgan, G.C. (1992). *Romano-British mortars and plasters*. Tesis Doctoral en Arqueología e Historia Antigua, University of Leicester.
- Ortega, E.O. (2001). Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas. *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 9(34), 78-89.
- Parra, C. (2020). Caracterización petrográfica y petrofísica de los principales conglomerantes (aéreos e hidráulicos) usados en la actualidad como morteros. *Trabajo Fin de Máster*. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid (UCM), 13 pp.
- Rodríguez, C., Sebastián, E (1994). Técnicas del análisis del sistema poroso de materiales pétreos ornamentales: usos y limitaciones. *Ingeniería Civil*, vol. 96: 130-142.
- Rodríguez-Sastre, M.A., Gutierrez-Claverol, M, Torres-Alonso, M., Rodríguez-Bouzo, L., (2004). Resistencia al rebote en materiales de la Formación Casaio (Ordovícico del NO de España). *Geogaceta*, vol. 36: 31-34
- Russel, S.A (1927). *Stone preservation committee report* (Aprendix I). H. M. Stationary Office, London.
- UNE EN 11358-1. *Termogravimetría (TG). Principios generales*. Asociación Española de Normalización y certificación (AENOR), Madrid, 2016.
- UNE EN 13925-2. *Ensayos no destructivos. Difracción de rayos X aplicada a materiales policristalinos y amorfos*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2003.
- UNE EN 13925-3. *Ensayos no destructivos. Difracción de rayos X aplicada a materiales policristalinos y amorfos*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2006.
- UNE EN 17187. *Conservación del patrimonio cultural. Caracterización de morteros utilizados en el patrimonio cultural*. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2020.

UNE EN 1936. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2007.

UNE EN 197- 1. *Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2011.

UNE EN 459-1. *Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.* Asociación Española de Normalización y certificación (AENOR), Madrid, 2016.

UNE-EN 12370. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia a la cristalización de sales.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2020.

UNE-EN 12371. *Métodos de ensayo de piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2011.

UNE-EN 14579. *Métodos de ensayos de piedra natural. Determinación de la velocidad de propagación del sonido.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2005.

UNE-EN 15886. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies.* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 2011.

Válek, J., Hughes, J.J., Groot, C.J.W.P. (2012) Historic Mortars: Characterization, Assessment and Repair. *RILEM Bookseries. Springer Science & Business Media, (7).*

Varas, M. J., Álvarez de Buergo, M., Fort, R. (2007). Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción. *Ayuntamiento de San Sebastián de los Reyes (Ed), Ciencia Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*, pp. 179-189.